



ИнтерКарто/ИнтерГИС

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ**

Материалы Международной конференции
Петрозаводск (Россия),
Бонн (Германия),
Анкоридж (США)
19 июля – 1 августа 2018 г.

Том 24

Часть 2

<http://intercarto.msu.ru>

Петрозаводск
2018

Организаторы:

*Международная картографическая ассоциация (МКА),
Международная академия наук Евразии,
Центр мировой системы данных по географии ICSU-WDS,
Русское географическое общество,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ),
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр
Российской академии наук» (КарНЦ РАН)*

И 732 ИнтерКарто/ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий:
Материалы Междунар. конф. – Т. 24, ч. 2. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. – 415 с.

Сборник включает материалы, представленные на Международную конференцию ИнтерКарто/ИнтерГИС 24. В статьях рассматриваются теоретические и методические аспекты геоинформационного обеспечения экологических, экономических и социальных составляющих устойчивого развития, вопросы развития геоинформатики, картографии, дистанционного зондирования Земли, проблемы экологической устойчивости и оценки воздействия на окружающую среду. Также рассматриваются возможности геоинформационного картографирования биоразнообразия и охраны природы, разработки мобильных ГИС, создания виртуальных географических сред и опыт их применения. Сборник выпускается один раз в год начиная с 1994 г.

Главный редактор: **В.С. Тикун** (МГУ, председатель комиссии «Геоинформатика для устойчивого развития» МКА)

Ответственный редактор: **М.В. Грибок** (МГУ)

Редакционная коллегия: **О.Е. Архипова** (Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону), **П.Я. Бакланов** (Тихоокеанский ин-т географии РАН, Владивосток), **В.С. Белозёров** (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь), **С.Н. Бобылёв** (МГУ), **Ф. Буйе** (член комиссии «Геоинформатика для устойчивого развития» МКА, Франция), **Вей Донг Цун** (Нац. исслед. центр инженерии и геоматики, Китай), **Г. Гиенко** (Ун-т Аляски, США), **М. Говоров** (Университетский Колледж Маласпина, Канада), **С. Горин** (Ун-т Св. Кирилла и Мефодия, Македония), **Н. Караниколас** (Ун-т Аристотеля, Греция), **Е.Г. Капралов** (Санкт-Петербургский государственный университет), **Т. Кольчугина** (Корпорация технологий устойчивого развития, США), **А.В. Кошкарёв** (Институт географии РАН), **Х. Кремерс** (заместитель председателя комиссии «Геоинформатика для устойчивого развития» МКА, Германия), **А. Курбан** (Синьцзянский ин-т экологии и географии, Китай), **Х. Линь** (Китайский ун-т Гонконга), **Д.В. Лисицкий** (Сибирский государственный ун-т геосистем и технологий, Новосибирск), **И.К. Лурье** (МГУ), **Ф. Де Мейер** (Гентский ун-т, Бельгия), **В.А. Мелкий** (Сахалинский государственный ун-т, Южно-Сахалинск), **М.В. Нырцов** (МГУ), **Г. Нямдава** (Министерство окружающей среды, зеленого развития и туризма, Монголия), **Ф. Ормелинг** (Ун-т Утрехта, Нидерланды), **А.В. Погорелов** (Кубанский государственный ун-т, Краснодар), **С.В. Пьянков** (Пермский государственный ун-т), **И.Н. Ротанова** (Алтайский государственный ун-т, Барнаул), **Н. Улуттекин** (Стамбульский технический ун-т, Турция), **Н.Н. Филатов** (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск), **М.-И. Фрейтас** (Гос. ун-т Сан-Паулу, Бразилия), **А.Н. Чумаченко** (Саратовский государственный ун-т).

При цитировании просим использовать точное наименование сборника.

Образцы цитирования:

Ivanov A.B., Petrov A.B. Title of the article. InterCarto/InterGIS. Proceedings of the International Conference. Petrozavodsk: KRC RAS, 2018, Vol. 24, part 2, pp. 110–120, DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120 (для цитирования на английском языке).

Иванов И.О., Петров И.О. Название статьи // ИнтерКарто/ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. – Т. 24, ч. 2. – С. 110–120, DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120 (для цитирования на русском языке).

Адрес редакции: Лаборатория комплексного картографирования географического факультета МГУ, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, комн. 2209, тел.: +7(495)939-23-54, e-mail: intercarto@yandex.ru
Интернет-сайт: intercarto.msu.ru

Издание осуществлено за счет гранта РФФИ № 18-05-20048



InterCarto/InterGIS

**GI SUPPORT OF SUSTAINABLE
DEVELOPMENT OF TERRITORIES**

Proceedings of the International Conference
Petrozavodsk (Russia),
Bonn (Germany),
Anchorage (USA)
July 19 – August 1, 2018

Volume 24

Part 2

<http://intercarto.msu.ru>

Petrozavodsk
2018

ISSN 2414-9179 (Print)
ISSN 2414-9209 (Online)

Organized by:
International Cartographic Association (ICA),
International Eurasian Academy of Sciences,
World Data Center for Geography ICSU-WDS,
Russian Geographical Society,
M.V. Lomonosov Moscow State University (MSU),
Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (KRC RAS)

InterCarto/InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International Conference. Vol. 24, part 2. Petrozavodsk: KRC RAS, 2018. 415 p.

The Proceedings include papers presented at the InterCarto/InterGIS 24 International Conference that discuss theoretical and methodical aspects of GIS support of environmental, economic and social components of sustainable development, development of geoinformatics, cartography, remote sensing, environmental sustainability and evaluation of the impact on the environment. Also discusses the possibilities of biodiversity and nature protection mapping, development of mobile GIS, the creation of virtual geographic environments and the experience of their application. The Proceedings have been published once per year since 1994.

Editor-in-Chief: **V. Tikunov** (MSU, Chairman of ICA Commission GI for Sustainability)

Managing Editor: **M. Gribok** (MSU)

Editorial Board: **O. Arkhipova** (Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences (RAS), Rostov-on-Don), **P. Baklanov** (Pacific Institute of Geography RAS, Vladivostok), **V. Belozyorov** (North-Caucasus Federal University, Stavropol), **S. Bobilyov** (MSU), **F. Bouillé** (Member of ICA Commission GI for Sustainability, France), **A. Chumachenko** (Saratov State University), **Cui Weihong** (National Engineering Research Center for Geomatics of China), **N. Filatov** (Institute of Water Problems of the North of KRS RAS, Petrozavodsk), **M.I. Freitas** (UNESP Universidade Estadual Paulista, Brazil), **G. Gienko** (University of Alaska, USA), **S. Gorin** (Ss. Cyril and Methodius University, Macedonia), **M. Govorov** (Malaspina University College, Canada), **Hui Lin** (Chinese University of Hong Kong), **N. Karanikolas** (Aristotle University of Thessaloniki, Greece), **E. Kapralov** (St. Petersburg State University), **T. Kolchugina** (Sustainable Development Technology Corporation, USA), **A. Koshkaryov** (Institute of Geography RAS, Moscow), **H. Kremers** (Deputy Chairman of ICA Commission GI for Sustainability, Germany), **A. Kurban** (Xinjiang Institute of Ecology and Geography, China), **D. Lisitsky** (Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk), **I. Lourie** (MSU), **Ph. De Maeyer** (Ghent University, Belgium), **V. Melkiy** (Sakhalin State University), **G. Nyamdavaa** (Ministry of Environment, Green Development and Tourism, Mongolia), **M. Nyrtsov** (MSU), **F. Ormeling** (Utrecht University, Netherlands), **A. Pogorelov** (Kuban State University, Krasnodar), **S. Pyankov** (Perm State University), **I. Rotanova** (Altai State University, Barnaul), **N. Ulugtekin** (Istanbul Technical University, Turkey).

Please use the exact name of the Proceedings for citations.

Citation example:

Ivanov A.B., Petrov A.B. Title of the article. InterCarto/InterGIS. Proceedings of the International Conference. Petrozavodsk: KRC RAS, 2018, Vol. 24, part 2, pp. 110–120, DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120.

Editorial Office:

Complex Mapping Laboratory, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University;
119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory 1, of. 2209; tel.: +7(495)939-23-54; e-mail: intercarto@yandex.ru
Website: intercarto.msu.ru

The publication realized by the grant from the Russian Foundation for Basic Research No 18-05-20048

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

REMOTE SENSING METHODS IN RESEARCH OF THE EARTH

УДК: 528.88

DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-5-17

Погорелов А.В.¹, Брусило В.А.², Граник Н.В.¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ГОРОДА ПО ДАННЫМ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются современные технологии инвентаризации зеленых насаждений в городе на основе дистанционного зондирования и мобильного лазерного сканирования. Городской зеленый фонд – это сложное хозяйство, требующее новых подходов, методов управления и технологий инвентаризации в современных условиях. В Краснодаре (площадь более 850 км²) на фоне беспрецедентно высоких темпов урбанизации происходит заметное изменение структуры и состава зеленых насаждений. Необходимым условием содержания, охраны и воспроизводства зеленых насаждений города является обеспеченность информацией о зеленом фонде. На практике требуются данные об объектах озеленения с точностью до отдельного дерева в составе парка, сквера и т. п.

Решается задача создания информационной системы зеленых насаждений муниципального образования на основе современных высокоточных технологий. Разработана технология мобильного лазерного сканирования городских объектов озеленения – парков, скверов, садов, газонов и т. п. Точность съемки 3–5 см, дальность сканирования до 190 м. Впервые в г. Краснодаре выполнена съемка зеленых насаждений мобильным лазерным сканером. Данные мобильного лазерного сканирования представлены облаками точек лазерного отражения по каждому объекту озеленения. Основным результатом работы – база геоданных, включающая высокоточные векторные модели муниципальных объектов озеленения (с разрешением до отдельного дерева), их атрибутивное описание, необходимое для городских служб озеленения. Векторные данные состоят из следующих слоев: границы объекта озеленения, газон, деревья, лунки старых деревьев, лунки молодых деревьев, кустарники, лунки кустарников, цветники, мобильные объекты, прочие объекты, декоративные

¹ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, 350040, Краснодар, Россия, e-mail: pogorelov_av@bk.ru

² Компания «Аэрогеоматика», ул. Фрунзе, 22/1, 350063, Краснодар, Россия, e-mail: brusilo.va@aerogeomatica.ru

материалы. Полученные атрибутивные сведения позволяют оценить затраты на содержание каждого объекта и соответствующие регламентные работы. Создана информационная основа для количественных оценок влияния зеленых насаждений на городской климат.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: город, зеленые насаждения, инвентаризация, мобильное лазерное сканирование, база геоданных.

Anatoly V. Pogorelov¹, Vladimir A. Brusilo², Nikolai V. Granik³

MODELING OF URBAN GREEN SPACES BASED ON MOBILE LASER SCANNING DATA

ABSTRACT

Modern technologies of inventory of green plantations in the city on the basis of remote sensing and mobile laser scanning are considered. The city green fund is the complex economy demanding new approaches, methods of management and technologies of inventory in modern conditions. In the city of Krasnodar (an area of more than 850 km²), amid an unprecedentedly high rate of urbanization, there is a marked change in the structure and composition of green spaces. A necessary condition for the content, protection and reproduction of urban green spaces is to provide information about the green fund. In practice, data are required about the objects of gardening with an accuracy of an individual tree in the park, square, etc.

We solve the problem of creation of information system of green spaces of the municipality on the basis of modern high technology. The technology of mobile laser scanning of urban landscaping objects – parks, squares, gardens, lawns, etc. has been developed. The accuracy of the survey is 3–5 cm, the scanning range is up to 190 m. For the first time in Krasnodar the mobile scanning of green plantations has been done. Mobile laser scanning data are represented by clouds of laser reflection points for each landscaping object. The main result of the work is a geodatabase, including high-precision vector models of municipal landscaping objects (with permission to an individual tree), their attributive description necessary for urban landscaping services. Vector data consist of the following layers: boundaries of the planting site, lawn, trees, old tree wells, young tree wells, shrubs, shrubbery wells, flower beds, mobile objects, other objects, decorative stuff. The received attributive information allows to estimate the costs for the maintenance of each object and the routine works. An information basis for quantitative assessments of the influence of green plantations on the urban climate has been created.

KEYWORDS: urban green spaces, inventory, mobile laser scanning, geodatabase.

ВВЕДЕНИЕ

Объекты озеленения представлены зелеными насаждениями – совокупностью древесных, кустарниковых и травянистых растений (городские парки, сады, скверы, газоны и т. п.). Ключевое предназначение зеленых насаждений в городах – рекреационное и климатообразующее. Парки, сады, скверы удовлетворяют рекреационные и эстетические потребности горожан. Древесные и травянистые растения обладают хорошей пылеулавливающей способностью, поглощают аэрозоли и загрязняющие вещества, способствуют очищению воздуха от химического загрязнения и восстановлению благоприятных кон-

¹ Kuban State University, Stavropolskaya str., 149, 350040, Krasnodar, Russia, *e-mail*: pogorelov_av@bk.ru

² Company "Aerogeomatica", Frunze str., 350063, Krasnodar, Russia, *e-mail*: brusilo.va@aerogeomatica.ru

концентраций CO_2 , O_2 , пыли и др. В среднем они осаждают из воздуха до 50 % пыли летом и до 37 % зимой [Груздев и др., 1990]. Многообразные воздействия зеленых насаждений на городской климат заключаются в смягчении колебаний температуры деятельной поверхности, регулировании влажностных характеристик воздуха и приземной циркуляции. Отметим и их физическое влияние на снижение уровня шума. Озеленение вокруг жилых домов снижает уровень стресса, депрессивных реакций; растительное окружение способствует увеличению физической активности людей.

Вместе с тем городской зеленый фонд – это сложное хозяйство, требующее новых подходов и методов управления в современных условиях. В систему озелененных территорий общего пользования г. Краснодара входят парки (площадь варьирует от 6,2 до 36,5 га), ботанические сады (от 16 до 48 га), скверы, бульвары, мемориальные парки, городские лесопарки. Кроме того, к зеленым насаждениям общего пользования относятся насаждения улиц и автодорог, цветники (клумбы), газоны и вазоны, а также внутридворовые посадки деревьев и кустарников.

Краснодар по показателям численности населения, принятым в России, фактически относится к категории крупнейших городов (более 1 млн человек). Фоновые климатические и ландшафтные условия г. Краснодара отнюдь не благоприятны для формирования и поддержки в функциональном состоянии массовых древесных и кустарниковых насаждений. Местный климат относится к семиаридному (полузасушливому) с коэффициентом увлажнения менее 1, чему соответствуют естественные ландшафты степей с преобладанием травянистых растений. Указанные обстоятельства и объяснимый фактический дефицит лесных массивов в окрестностях Краснодара предъявляют особые требования к формированию «зеленого каркаса» города, в том числе обеспечения ландшафтного и биологического разнообразия городских территорий. К городу примыкает р. Кубань с редкими сохранившимися фрагментами пойменных лесов.

На фоне высоких темпов роста Краснодара, сопровождающихся уплотнительной городской застройкой и расширением сети наземных коммуникаций, происходит изменение существующей системы зеленых насаждений. Происходящие буквально на глазах многонаправленные изменения краснодарской агломерации нельзя назвать всесторонне обдуманными; это относится и к преобразованиям зеленого фонда. Необходимым условием содержания, охраны и воспроизводства зеленых насаждений города является обеспеченность информацией о зеленом фонде. В связи с этим большое значение приобретают актуальные и точные (включая пространственный аспект) сведения о состоянии зеленых насаждений и структуре озелененных площадей города. Разные аспекты исследования городских зеленых насаждений с применением современных технологий отражены в ряде публикаций [Морозова, 2009; Морозова и др., 2011; Кулакова, 2012; Martin Mwirigi M'ikiugu et al., 2012; Mohd Hisyam Rasidia et al., 2012; Алешин и др., 2014; Mougiakou, Photis, 2014; Крючков, 2015 и др.].

Поставлена цель – создать информационную систему зеленых насаждений муниципального образования г. Краснодар на основе современных высокоточных технологий – мобильного лазерного сканирования. Достижение цели предполагает: 1) разработку технологий инвентаризации зеленых насаждений и объектов инфраструктуры зеленого фонда города (цветники, газоны, аллеи, парки, скверы и т. п.) средствами мобильного лазерного сканирования; 2) проведение мобильного лазерного сканирования муниципальных объектов озеленения МО г. Краснодар; 3) разработку методики обработки данных мобильного лазерного сканирования зеленых и обработку результатов съемки; 4) создание рабочей ГИС системы зеленых насаждений МО г. Краснодар, предназначенную для учета и мониторинга объектов озеленения. ГИС учтенных зеленых насаждений предположительно должна быть интегрирована в муниципальную ГИС г. Краснодара.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Спутниковый мониторинг. Для планирования и оптимизации зеленого каркаса необходимо иметь детальное представление о фактическом распределении растительности, включая ее типы, видовой состав, биомассу и т. д. В крупных городах кадастры зеленых насаждений, как правило, являются неполными, нечасто обновляются. Как правило, контроль за функциональным состоянием городской растительности и ее факторами (состояние почв, болезни, поражение насекомыми, устойчивость растений к городскому загрязнению и т. д.) оставляет желать лучшего. Известно, что разные породы имеют неодинаковую устойчивость к загрязнению воздуха и окружающей среды. В этом случае данные дистанционного мониторинга могут оказаться очень полезными для ведения городского кадастра зеленых насаждений, создания автоматизированных систем их обновления, а также для контроля растительности. Это особенно важно для крупных городов и агломераций, на территории которых произрастают сотни тысяч деревьев [Кавайяс и др., 2011]. В последнее время возможности дистанционного мониторинга земной поверхности расширяются за счет малых беспилотных летательных аппаратов (МБПЛА).

Наземный контроль состояния зеленого фонда г. Краснодара с учетом значительной площади города – трудоемкая процедура. Поэтому для фоновых оценок целесообразно воспользоваться данными дистанционного зондирования – мультиспектральными спутниковыми снимками. Чаще всего в этом случае прибегают к простому и информативному показателю – вегетационному индексу (Normalized Differenced Vegetation Index – NDVI) [Lillesand et al., 2004; Jwan Al-doski et al., 2013; Meera Gandhi et al., 2015; Баймаганбетова, Голубева, 2016; Погорелов, Липилин, 2017; Погорелов и др., 2017 и др.]. Сведения об использованных спутниковых снимках даны в табл. 1.

Таблица 1. Сведения о спутниковых снимках
Table 1. Space images

Спутник	ID снимка	Дата съемки
Landsat 4	LT41740291989191XXX02	10.07.1989
Landsat 8	LC81740292015159LGN00	08.06.2015

Мобильное лазерное сканирование. Съемка зеленых насаждений выполняется мобильным лазерным сканером (лидаром) – съемочной системой, измеряющей со скоростью от нескольких тысяч до миллиона точек в секунду расстояния до поверхности объекта с регистрацией вертикальных и горизонтальных углов и последующим формированием трехмерного изображения в виде облака точек. Используемый сканер АГМ – MC7 состоит из трех модулей: сканирующей системы PENTAX S2100, панорамной камеры Point Grey LadyBug 5, GNSS-антенны. Дополнительный графический продукт съемки – сферические панорамы. Точность съемки 3–5 см, дальность сканирования до 190 м. Производительность работ характеризуется протяженностью выполняемой съемки за день работ, которая для городских и пригородных территорий составляет 50–80 и 150–350 км соответственно. Съемка производится в режиме мобильного сканирования (рис. 1), т. е. с крыши легкового автомобиля. Мобильные сканеры позволяют полностью автоматизировать сбор цифровой трехмерной информации, значительно сократив себестоимость работ в сравнении с традиционными технологиями съемки.

Мобильное лазерное сканирование выполнено в период с 25 ноября по 26 декабря 2017 г., в марте 2018 г. проведены дополнительные измерения. В результате съемки получены точки лазерного отражения по всем учтенным муниципальным объектам озеленения. Данные съемки (точки лазерного отражения, панорамная съемка) обработаны в среде ПО (Microstation CONNECT Edition, пакеты программ TerraSolid, ArcGIS, Autodesk AutoCAD Civil 3D) с последующим созданием трех- и двухмерных моделей объектов озеленения с заданной точностью.

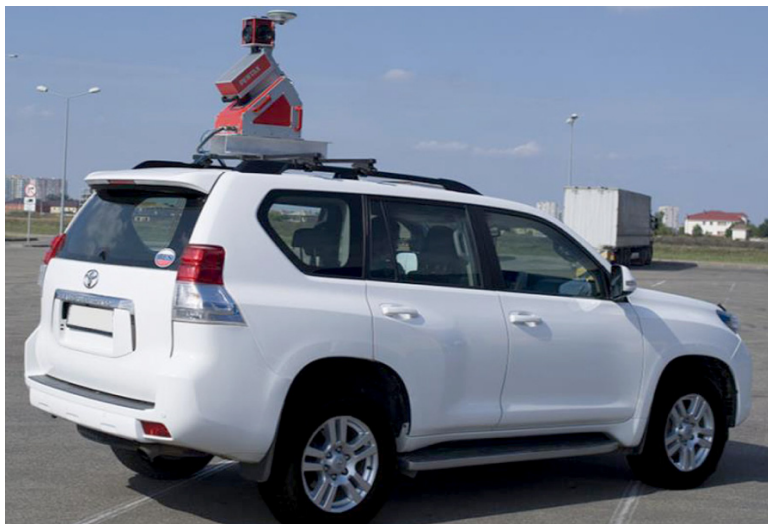


Рис. 1. Автомобиль, оснащенный лазерным сканером АГМ-МС7
для мобильного сканирования

Fig. 1. A car equipped with a laser scanner AGM-MS7 for mobile scanning

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спутниковый мониторинг зеленых насаждений. Показатели NDVI при классификации разбиты нами на интервалы: 1) меньше 0,25 – «голые» бесплодные поверхности, 2) 0,25–0,5 – редкая растительность (преимущественно травы, кустарники), 3) 0,5–0,75 – умеренная растительность, 4) 0,75–0,9 – густая растительность, 5) более 0,9 – густая растительность с наибольшей продуктивностью (условный лес) [Погорелов, Липилин, 2017; Погорелов и др., 2017]. Как видим, по данным летних снимков 1989 и 2015 гг. (рис. 2), распределение относительной фитомассы в пределах городской территории чрезвычайно неоднородно. Наибольшие значения NDVI приурочены к участкам парков, включая мемориальные парки (кладбища) и сады: Чистяковская роща, Всесвятское кладбище, парк им. 30-летия Победы, Городской сад, Ботанический сад КубГАУ. На значительной части территории города (участки производственной и жилой зон, транспортная инфраструктура и т. п.) показатели индекса соответствуют «голым» поверхностям.

В целом в Краснодаре в анализируемых границах площади потерь и увеличения относительной фитомассы за 1989–2015 гг. оказались сопоставимы (табл. 2). В рекреационной зоне суммарные площади увеличения фитомассы (16,29 км²) заметно превышают интегральные площади ее потерь (8,53 км²). Таким образом, по данным показателям можно констатировать улучшение степени озеленения в рекреационной зоне Краснодара в целом, прежде всего, за счет парков. Однако, как и следовало ожидать, в жилой зоне в целом степень озеленения радикально ухудшилась.

Таблица 2. Площади с измененной относительной фитомассой, км². Период 1989–2015 гг.
Table 2. Areas with a changed relative phytomass, km². The period 1989–2015

Территория	Изменения относительной фитомассы			
	менее –0,5	–0,5...0	0...0,5	более 0,5
Краснодар в границах 2007 г.	5,21	95,02	97,17	3,73
Жилая зона	1,70	39,95	27,02	0,60
Общественно-деловая зона	0,58	10,63	13,46	0,18
Рекреационная зона	0,58	7,95	15,13	1,16
Промышленная зона	0,46	5,45	8,19	0,30



Рис. 2. Распределение вегетационного индекса NDVI
в центральной части Краснодара 08.06.2015
Fig. 2. Distribution of vegetative index NDVI
in the central part of Krasnodar 08.06.2015

Разность величин NDVI по данным 2015 г. и 1989 г. дает представление об изменениях фитомассы внутри города за 26-летний период. Красно-желтые участки свидетельствуют об уменьшении относительной фитомассы с 1989 г. по 2015 г., зеленые – об увеличении (рис. 3).

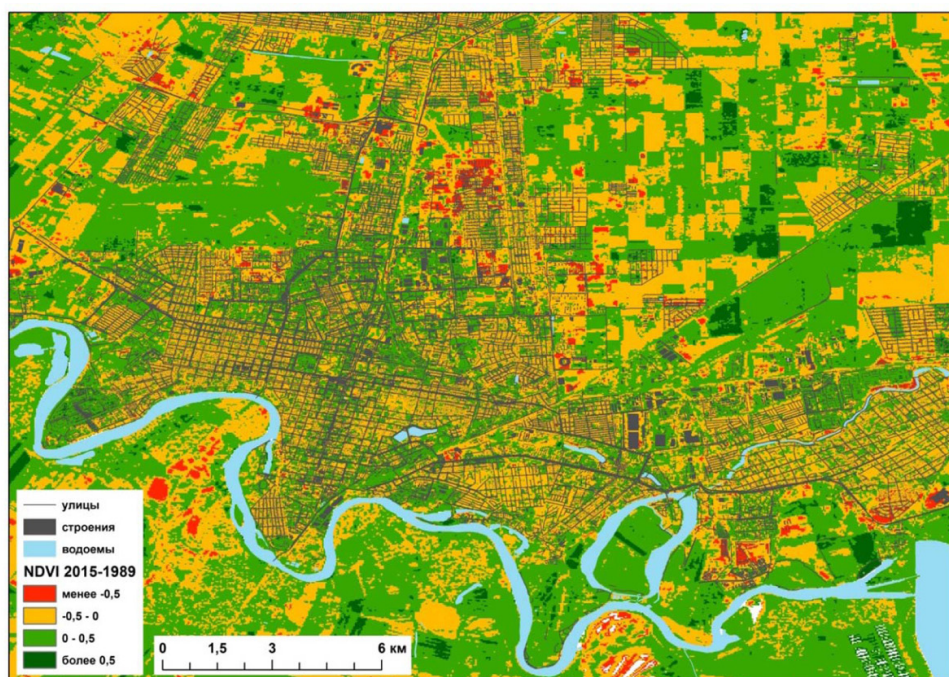


Рис. 3. Разность NDVI по данным 2015 и 1989 гг.
Fig. 3. Difference NDVI according to data of 2015 and 1989

Мобильное лазерное сканирование. Инвентаризация зеленых насаждений с использованием традиционной геодезии (тахеометрическая съемка) – весьма затратный процесс, имея в виду площадь Краснодара (более 850 км²) и количество объектов. Данные спутниковых снимков позволяют получить фоновые сведения о состоянии зеленых насаждений по оценкам удельной фитомассы. Для озеленительной деятельности на практике требуются данные об объектах озеленения с точностью до отдельного дерева в составе соответствующего объекта (парка, сквера и т. п.). В настоящее время перечень только муниципальных объектов озеленения Краснодара представлен 153 объектами (табл. 3). При этом объекты озеленения зачастую имеют сложную внутреннюю структуру и неоднородный состав (рис. 4), что дополнительно усложняет их описание.

Таблица 3. Перечень муниципальных объектов озеленения Краснодара (фрагмент)
Table 3. List of municipal landscaping objects of Krasnodar (fragment)

№ п/п	Объект озеленения	Предварительная общая площадь объекта озеленения, м ²
1	Территория, прилегающая к монументу «Зенитчикам» по ул. Ставропольской, 151, а	1027,91
2	Территория, прилегающая к зданию Советского районного суда по ул. Ставропольской, 207	1071,0
3	Территория, прилегающая к Стелле у оз. Старая Кубань по ул. Ставропольской	959,0
4	Территория, прилегающая к жилым домам по ул. Ставропольской, 215, 217, 221, 221/1, 221/2	2535,5
5	Территория разделительной полосы по ул. Ставропольской от ул. Вишняковой до ул. Мачуги (вдоль трамвайных путей)	19956,0
6	Зеленые зоны и декоративные кустарники по ул. Ставропольской и ул. Трамвайной (от ул. Суворова до ул. Мачуги)	18385,69
7	Территория разделительной полосы по ул. Мачуги и круга в районе ТЭЦ	1230,21
...
152	Зеленые зоны перед зданием УФНС по Краснодарскому краю по ул. Гоголя, 90	110,7
153	Территория бульвара «Тюляевский» (от ул. Уральской до ул. Сормовской)	6490,91

На подготовительном этапе в соответствии с перечнем объектов озеленения в ГИС QGIS Desktop построена схема для проведения съемочных работ. Данные мобильного лазерного сканирования представлены облаками точек лазерного отражения по каждому объекту озеленения. Исходные данные в виде облака точек иллюстрирует объект озеленения № 7 – участок разделительной полосы на ул. Мачуги в районе Краснодарской ТЭЦ (рис. 5, 6).

Наиболее трудоемкий и технологически сложный этап работы – обработка материалов лазерного сканирования, в том числе – оцифровка объектов с требуемой точностью. Слои и атрибуты для каждого объекта, согласованные с Центром озеленения и экологии г. Краснодара, представлены в табл. 4. Атрибутивные сведения необходимы, прежде всего, для оценки финансовых затрат в соответствии с регламентом работ на конкретном объекте озеленения, зависящих от типа объекта и обслуживаемой площади.

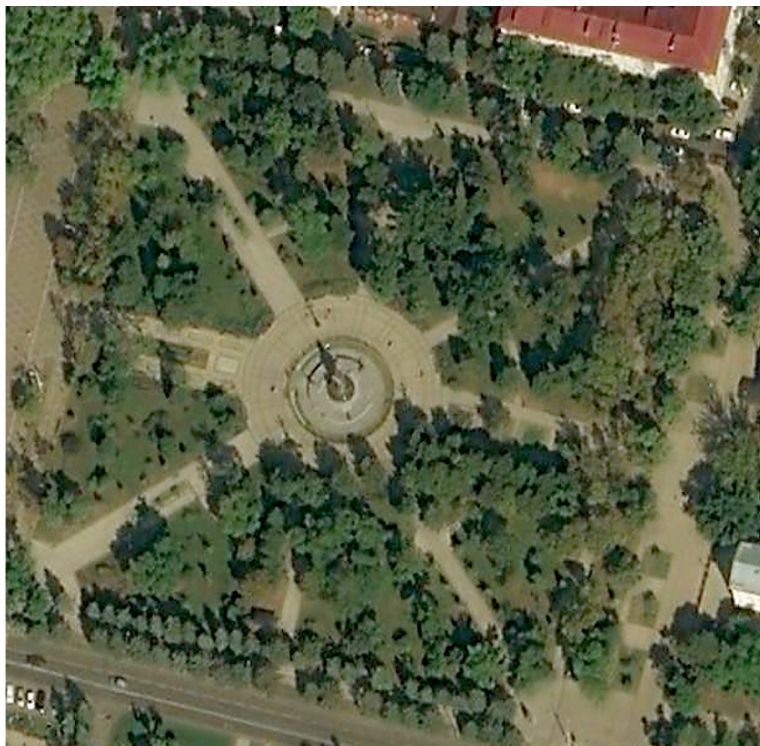


Рис. 4. Екатеринбургский сквер.

Пример объекта озеленения со сложными структурой и составом

Fig. 4. Ekatherininsky Square.

Example of a landscaping object with a complex structure and composition



Рис. 5. Облако точек лазерного отражения, используемое для моделирования объекта озеленения. Объект озеленения № 7

Fig. 5. A cloud of laser reflection points used to model a landscaping object. Object No 7

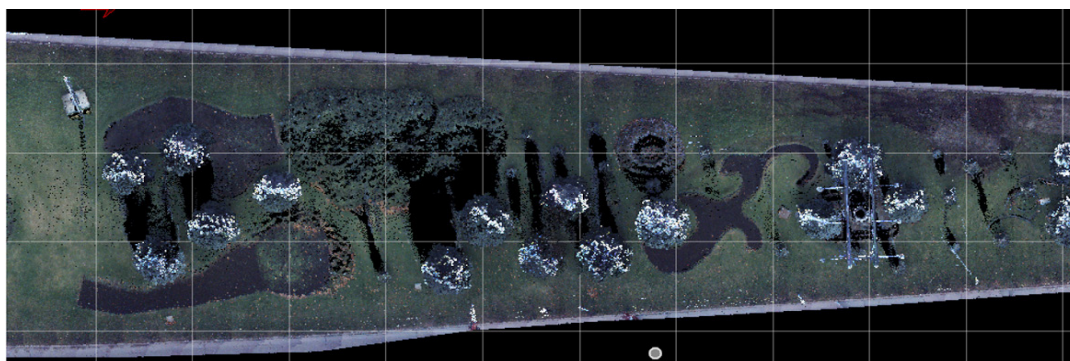


Рис. 6. Увеличенный фрагмент объекта озеленения № 7 с точками лазерного отражения

Fig. 6. An enlarged fragment of the object No 7 with laser reflection points

Таблица 4. Векторные слои и атрибуты объектов озеленения
Table 4. Vector layers and attributes of landscaping objects

№	Векторные слои	Геометрия	Атрибуты слоя
1	Граница объекта	Полигон	Площадь, м ²
2	Газон	Полигон	Площадь, м ²
3	Деревья	Точка	Высота, тип
4	Лунки старых деревьев	Полигон	Площадь, тип
5	Лунки молодых деревьев	Полигон	Площадь, тип
6	Кустарники	Полигон	Площадь, тип
7	Лунки кустарников	Полигон	Площадь, тип
8	Цветники	Полигон	Площадь, тип
9	Мобильные объекты	Полигон	Площадь, тип
10	Прочие объекты	Полигон	Площадь, тип
11	Декоративные материалы	Полигон	Площадь, тип

Обработка материалов включала основные операции: оцифровку, конвертацию, атрибутивное описание, нормативный контроль. Некоторые операции в последовательности их выполнения и результаты работы отражают рисунки (рис. 6–9). Облако точек лазерного отражения обрабатывалось программе в Microstation CONNECT Edition при помощи пакетов TerraScan и TerraSolid. Для получения дополнительной информации об объекте по данным панорамной съемки использовался модуль TerraPhoto, входящий в состав пакета TerraSolid (рис. 7).

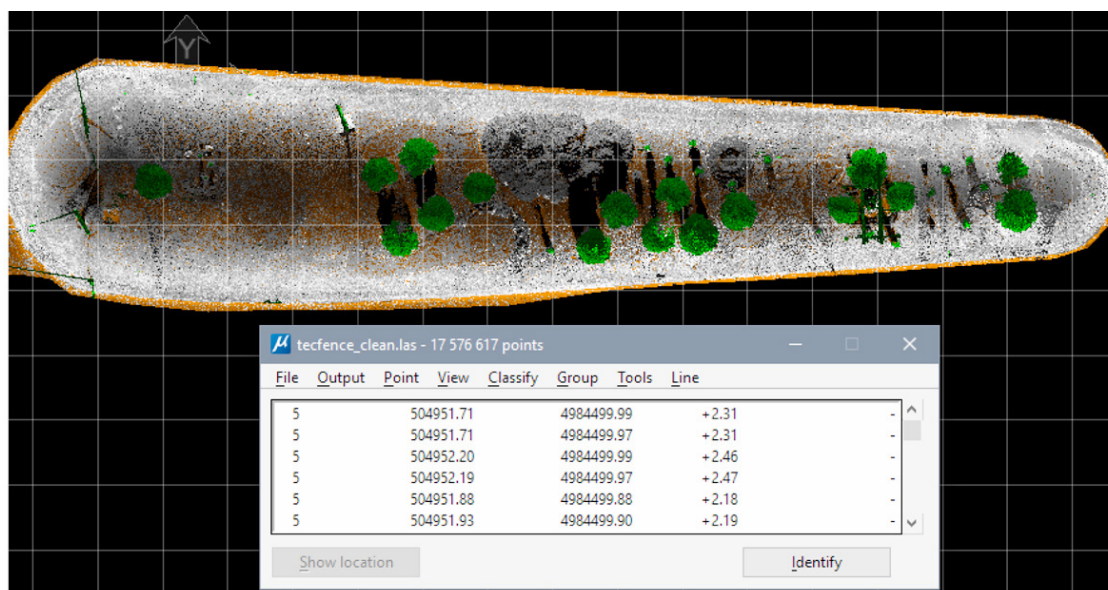


Рис. 7. Облако точек в интерфейсе программы TerraScan
Fig. 7. Point cloud in the TerraScan interface

Границы объекта озеленения определялись с использованием данных лазерного сканирования и растровых схем, предоставленных городским Центром озеленения и экологии. Оцифровка объекта выполнялась с помощью инструментов программы Microstation CONNECT Edition. Результат оцифровки – наборы векторных данных (полилинии, точки) в соответствии с заданными слоями (см. табл. 4). Пример объекта представлен на рис. 8.



Рис. 8. Панорама объекта озеленения в интерфейсе программы TerraPhoto
Fig. 8. Panorama of the landscaping object in the TerraPhoto interface

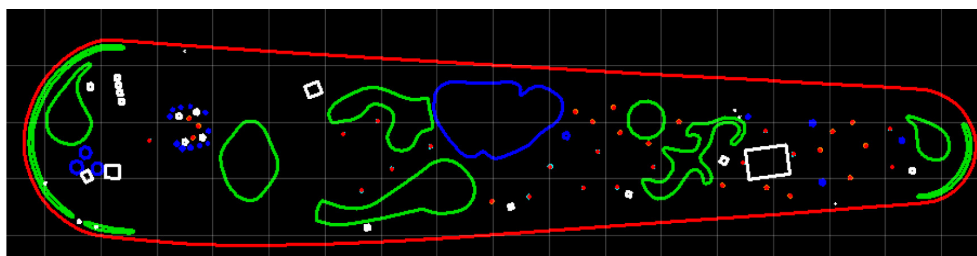


Рис. 9. Пример векторной модели объекта № 7
Fig. 9. Example of a vector model of object No 7

Готовые данные (рис. 10), включающие соответствующие файлы в формате .dwg и .shp, предназначены для практической деятельности МКУ МО г. Краснодар «Центр озеленения и экологии», нацеленной на инвентаризацию объектов озеленения и выполнение регламентных работ.

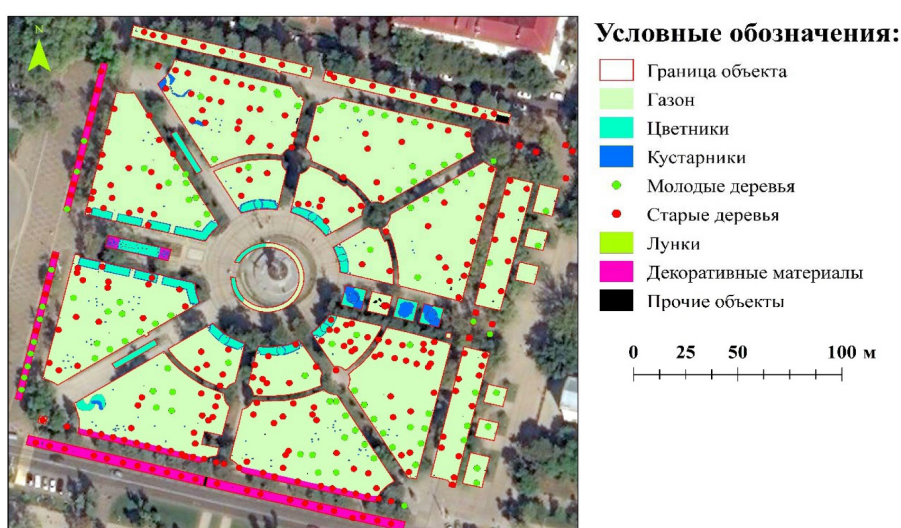


Рис. 10. Модель Екатерининского сквера
в базе геоданных зеленых насаждений МО г. Краснодар
Fig. 10. Model of the Ekatherininsky Square
in the geodatabase of green plantings in the city of Krasnodar

ВЫВОДЫ

Таким образом, впервые выполнен учет зеленых насаждений города на основе современных высокоточных технологий – мобильного лазерного сканирования.

1. Разработана и реализована методика мобильного лазерного сканирования городских объектов озеленения (МО г. Краснодар) (см. рис. 10). Методика включает сканирование, обработку точек лазерного отражения, построение сферических панорам, построение трехмерных моделей объектов, создание базы геоданных зеленых насаждений.

2. Разработана технологическая цепочка обработки данных мобильного лазерного сканирования с использованием комплекса прикладных программ и ГИС; построены векторные модели и выполнено атрибутивное описание муниципальных объектов озеленения МО г. Краснодар.

3. Построены цифровые модели муниципальных объектов озеленения (парки, сады, скверы и др.) МО г. Краснодар с точностью до отдельного дерева и куста. По данным лазерного сканирования и сферической панорамной съемки созданы файлы в формате .dwg и .shp, предназначенные для службы озеленения.

4. Предлагаемая методика выводит на новый технический уровень возможности мониторинга и инвентаризации зеленых насаждений крупного города. При этом сроки выполнения работ и их стоимость в сравнении с традиционными технологиями уменьшены более чем в 3 раза.

5. Создана информационная основа для количественных оценок влияния зеленых насаждений на местный климат.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят компанию ООО «Аэрогеоматика» за техническое содействие.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the company "Aerogeomatica" for technical support.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алёшин Р., Спивак И., Давыденко Е., Куликов В. Разработка и внедрение ГИС учтенных зеленых насаждений // САПР и графика. 2014. № 3. С. 18–20.
2. Баймаганбетова Г.А., Голубева Е.И. Космические снимки для картографирования и мониторинга состояния зеленого каркаса г. Астаны // ИнтерКарто/ИнтерГИС 22. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата: материалы Междунар. науч. конф. Т. 1. М.: Изд. дом «Научная библиотека», 2016. С. 370–379. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-370-380.
3. Груздев Г.С., Дорожкина Л.А., Петриченко С.А. Защита зеленых насаждений в городах: справочник. М., 1990. 544 с.
4. Кавайяс Ф., Рамос Ю., Бойе А. Инвентаризация городских зеленых насаждений и их мониторинг с использованием данных WorldView-2 // Геоматика. 2011. № 3. С. 67–73.
5. Крючков А.Н. Мониторинг состояния городских зеленых насаждений как часть эффективного управления зеленым хозяйством Г. О. Тольятти // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 11 (27), № 1(6). С. 1170–1173.
6. Кулакова С.А. Оценка состояния зеленых насаждений города // Географический вестник. 2012. № 4(23). С. 59–66.
7. Морозова Г.Ю. Мониторинг урбанизированной среды: структура популяций растений // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11 (27), № 1(6). С. 1170–1173.

8. *Морозова Г.Ю., Глухов В.А., Бабурин А.А.* Геоинформационная система «Зеленые насаждения города Хабаровска» // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13, №1(6). С. 1367–1370.
9. *Погорелов А.В., Липилин Д.А.* Зеленые насаждения города Краснодара. Оценка и многолетние изменения // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2017. № 3 (27). С. 192–205. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.03.15.
10. *Погорелов А.В., Липилин Д.А., Лубенцова А.А.* Оценка многолетних изменений зеленых насаждений города Краснодара по данным спутниковых снимков // Региональные географические исследования. Сборник научных трудов. Краснодар, 2017. Вып. 1(11). С. 119–137.
11. *Jwan Al-doski, Shattri. B Mansor; Helmi Zulhaidi Mohd Shafri.* NDVI differencing and post-classification to detect vegetation changes in Halabja city, Iraq // Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG). 2013. V. 1, No 2. P. 1–10.
12. *Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W.* Remote Sensing and Image Interpretation. Fifth Edition. New Jersey: John Wiley and Sons, 2004. 804 p.
13. *Martin Mwirigi M'Ikiugu, Isami Kinoshita, Yoritaka Tashiro.* Urban Green Space Analysis and Identification of its Potential Expansion Areas // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2012. V. 35. P. 449–458.
14. *Meera Gandhi G., Parthiban S., Nagaraj Thummalu, Christy A.* NDVI: vegetation change detection using remote sensing and GIS – A case study of vellore district // Procedia Computer Science. 2015. V. 57. P. 1199–1210.
15. *Mohd Hisyam Rasidia, Nurzuliza Jamirsahb, Ismail Saidc.* Urban Green Space Design Affects Urban Residents' Social Interaction // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2012. V. 68. P. 464–480.
16. *Mougiakou Eleni, Photis Yorgos N.* Urban green space network evaluation and planning: optimizing accessibility based on connectivity and raster GIS analysis // European Journal of Geography. 2014. V. 5. November. P. 19–46.

REFERENCES

1. *Alyoshin R., Spivak I., Davydenko E., Kulikov V.* Development and introduction of GIS of registered green plantations. SAPR i grafika. 2014. No 3. P. 18–20 (in Russian).
2. *Baymaganbetova G.A., Golubeva Ye.I.* Satellite images for mapping and monitoring the state of the green framework in Astana city. InterCarto/InterGIS 22. Proceedings of the International conference "InterCarto/InterGIS". T. 1. M.: Izdatel'skiy dom "Nauchnaya biblioteka", 2016. P. 370–379. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-370-380 (in Russian).
3. *Gruzdev G.S., Dorozhkina L.A., Petrichenko S.A.* Protection of green spaces in cities: a guide. M., 1990. 544 p. (in Russian).
4. *Jwan Al-doski, Shattri. B Mansor; Helmi Zulhaidi Mohd Shafri.* NDVI differencing and post-classification to detect vegetation changes in Halabja city, Iraq. Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG). 2013. V. 1, No 2. P. 1–10.
5. *Kavajyas F., Ramos Yu., Boje A.* Inventory of urban green spaces and their monitoring using WorldView-2 data. Geomatica. 2011. No 3. P. 67–73 (in Russian).
6. *Kryuchkov A.N.* Monitoring of the state of urban green spaces as part of effective management of green economy of Tolyatti city. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2015. T. 11 (27), No 1(6). P. 1170–1173 (in Russian).
7. *Kulakova S.A.* Assessment of the state of green spaces of the city. Vestnik PGU. 2012. No 4(23). P. 59–66 (in Russian).
8. *Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman, J.W.* Remote Sensing and Image Interpretation. Fifth Edition. New Jersey: John Wiley and Sons, 2004. 804 p.

9. *Martin Mwirigi M'Ikiugu, Isami Kinoshita, Yoritaka Tashiro*. Urban Green Space Analysis and Identification of its Potential Expansion Areas. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2012. V. 35. P. 449–458.
10. *Meera Gandhi G., Parthiban S., Nagaraj Thummalu, Christy A.* NDVI: vegetation change detection using remote sensing and GIS – A case study of vellore district. *Procedia Computer Science*. 2015. V. 57. P. 1199–1210.
11. *Mohd Hisyam Rasidia, Nurzuliza Jamirsahb, Ismail Saidc*. Urban Green Space Design Affects Urban Residents' Social Interaction. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2012. V. 68. P. 464–480.
12. *Morozova G.Yu.* Monitoring of urban environment: the structure of plant populations. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2009. T. 11 (27), No 1(6). P. 1170–1173 (in Russian).
13. *Morozova G.Yu., Gluhov V.A., Baburin A.A.* Geoinformation system «Green plantings of the city of Khabarovsk». *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2011. V. 13, No 1(6). P. 1367–1370 (in Russian).
14. *Mougiakou Eleni, Photis Yorgos N.* Urban green space network evaluation and planning: optimizing accessibility based on connectivity and raster GIS analysis. *European Journal of Geography*. 2014. V. 5. November. P. 19–46.
15. *Pogorelov A.V., Lipilin D.A.* Green spaces of the city of Krasnodar. Assessment and long-term changes. *Vestnik PNIPU. Applied ecology. Urbanistics*. 2017. No 3 (27). P. 192–205. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.03.15 (in Russian).
16. *Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Lubencova A.A.* Assessment of long-term changes in the greenery of the city of Krasnodar according to satellite images. *Regional Geographical Research. Sbornik nauchnyh trudov. Krasnodar*. 2017. V. 1(11). P. 119–137 (in Russian).

Кравцова В.И.¹

КОСМИЧЕСКИЕ СНИМКИ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ АТЛАСЕ РОССИИ

АННОТАЦИЯ

Новое издание Экологического атласа России (2017) оснащено космическими снимками, помогающими решить основную задачу атласа – показать современную экологическую обстановку на территории России, осветить разнообразие взаимоотношений природы и общества, используя доступные средства визуализации. Включение космических снимков в атлас связано с тем, что они объективно, беспристрастно передают современное состояние природы, отражая неблагоприятное антропогенное воздействие во всех средах – загрязнение воздуха и вод, нарушение и загрязнение земной поверхности, ее растительного покрова. В атласе приводятся материалы космической съемки в разной форме, решаемые ими задачи также различны. Выделено четыре целевых направления использования космической информации. **К первой** относятся снимки, преобразованные и превращенные в фотокарты разного тематического содержания, которые используются в атласе **на правах карт** (так же как и тематические карты, составленные по космическим снимкам). Это относится к материалам по миру в целом (огни Земли) и территории России, для которой приведены фотокарты состояния ее поверхности летом и зимой, а также фотокарты земных покровов, растительности, используемого для оценки продуктивности геосистем показателя «вегетационного индекса» NDVI и его сезонных изменений. **Вторую группу** составляют снимки, применяемые в качестве **дополнения к картам**, визуализирующие отображаемые на картах объекты. Они играют важную роль для лучшего понимания традиционных карт атласа. На снимках даны характерные примеры изображения всех основных типов ландшафтов в точном соответствии с легендой карты. Особенно ценно подобное дополнение для такого показателя, как структуры почвенного покрова, названия которых в легенде не позволяют пространственно представить эти структуры, а снимки успешно решают эту задачу. **К третьей группе** относятся снимки, отражающие **воздействие хозяйственной деятельности на окружающую среду** – загрязнение воздуха и вод, нарушения и загрязнение поверхности, особенно при добыче разнообразных полезных ископаемых. И, наконец, **четвертую** составляют снимки, показывающие плачевные **результаты антропогенного воздействия**, в первую очередь, в промышленных городах. Отдельно выделены промышленные города экологически уязвимых районов Севера. Две последние группы ввиду их особой важности наиболее разнообразны и многочисленны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космические снимки, отображение, визуализация, антропогенное воздействие, экологические проблемы.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: valentinamsu@yandex.ru

Valentina I. Kravtsova¹

SATELLITE IMAGES IN ECOLOGICAL ATLAS OF RUSSIA

ABSTRACT

The new edition of Ecological atlas of Russia (2017) is rigged with satellite images which helps to decide the main goal of atlas – to show the recent ecological situation at Russia territory, to discover diversity of nature and society connections, using accessible means of visualization. Including of satellite images into atlas caused with the obstacle that they impartiality show the recent stage of nature and reflect unfavorable anthropogenic impact to all mediums – air pollution and water contamination, disturbing and pollution of earth surface, its vegetation cover. Materials of satellite survey have been shown in atlas in different form and with various goals. Four tasks directions of satellite information applying may be named. *The first* of them includes satellite images, processed and transformed into photomaps of various thematic content. They represent in atlas *at rules of maps* (as well as thematic maps compiled by satellite images). Such are materials for the whole world (lights at the Earth) and the territory of Russia, for which the atlas contents: photomaps of its surface stage in winter and summer seasons; photomaps of land cover; vegetation cover; exponent "vegetation index" NDVI and its seasonal changes, using for estimation of geosystems productivity. *The second* group consist of images, using *as addition to maps* for visualization of mapped objects. They play important role for better understanding of some traditional maps. So images show characteristic oblique of different landscapes in accuracy corresponding with legend of the landscapes map. Such addition especially important for so exponent as soil cover structure: their names in legend does not let to represent these structures in space, but satellite images carry out this task. The third group includes images, which reflect influence of economics activity to environment – contamination of water and air, destruction and pollution of earth surface, especially under minerals exploration. And at least *the fourth* group consists of images, which shows sad *results of anthropogenic impact*, at first in industry towns. Industrial towns of the North regions, ecologically the most vulnerable, have been especially distinguished. The last two groups are the most numerous and multiform due to their grate importance.

KEYWORDS: satellite images, reflection, visualization, anthropogenic impact, ecological problems.

ВВЕДЕНИЕ

Космические снимки объективно, беспристрастно фиксируют состояние земной поверхности, отражают его на строго определенный момент времени, когда производилась съемка. Они передают картину экологического неблагополучия, указывают на его источники и причины, в том числе противоправные действия человека на земле, могут служить и уже используются как юридические документы при решении спорных вопросов природопользования. Постоянное совершенствование космических снимков, повышение пространственного разрешения и повторяемости съемки, освоение новых спектральных диапазонов делает их одним из надежных средств экологического мониторинга. Поэтому широкий круг специалистов по экологическим проблемам заинтересован в привлечении космических материалов, освоении работы с ними. В дополнение к этим несомненным достоинствам снимки выразительно передают картину земной поверхности, привлекают

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: valentinamsu@yandex.ru

внимание узнаваемостью ее деталей, побуждают к ее дальнейшему исследованию, порождают творческую мысль.

Несомненные достоинства космических снимков при рассмотрении и решении разнообразных экологических проблем обусловили их включение в новое издание Экологического атласа России [Касимов и др., 2009], в котором содержится более 100 документов, основанных на материалах космической съемки, и им посвящено 50 страниц, т. е. 10 % объема атласа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В атлас включены как оригинальные космические снимки на конкретную дату, составляющие большую часть приводимых материалов, так и некоторые результаты их обработки на пути от снимка к карте. Это прежде всего сочленение массивов снимков для покрытия обширных территорий, к каким относится Россия; объединение снимков за разные даты для характеристики определенного временного интервала, например, создание сезонных изображений; выделение на снимках исследуемых объектов или выполнение компьютерной классификации, завершающейся по существу тематической фотокарты; и, наконец, создание по снимкам тематической карты, отражающей состояние объектов на определенную дату или их изменение за определенный интервал времени.

Большая часть показанных в атласе космических снимков, иллюстрирующих в локальных масштабах антропогенное воздействие на природу и его результаты в виде нарушений поверхности, деградации растительности, загрязнения воздуха и вод, представляют собой фрагменты снимков со спутников Meteor, Ресурс-Ф, Landsat, SPOT, а также снимков высокого разрешения со спутников Ikonos, QuickBird, GeoEye, включенных в бесшовные покрытия информационных систем «Космоснимки», GoogleEarth, рекомендуемых нами для тематического картографирования [Кравцова, 2017]. Визуальный анализ этих детальных снимков выполнен с привлечением всех возможных материалов о территории, в том числе широко представленных в Интернете, а анализ результатов антропогенного воздействия в промышленных городах проведен на основе их эколого-экономико-географических исследований [Битюкова, 2015]. Региональный анализ изменений природных геосистем в результате антропогенного воздействия проводился на основе автоматизированной обработки полученных в разные годы снимков со спутников Landsat, SPOT, для чего разработаны специальные методы компьютерной классификации [Экология Севера, 2003]. Космические изображения, охватывающие территорию России в целом, получены со спутника Terra по материалам съемки системой MODIS, методы обработки которых для создания фотокарт и тематических карт разработаны в ИКИ РАН [Барталев, Лупян, 2013]. Ночная фотокарта мира получена НАСА по снимкам спутника DMSP.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как указывалось, в атласе приводятся материалы космической съемки как оригинальные, так и в разной степени обработанные на пути от снимка к карте. Решаемые ими задачи различны; можно выделить четыре целевых направления использования космических материалов. **К первому** относятся снимки, преобразованные и превращенные в фотокарты разного тематического содержания, которые включены в атлас *на правах карт* (так же как и тематические карты, составленные по космическим снимкам). Это относится к материалам по миру в целом и территории России. Атлас открывает фотокарты ночных огней Земли, на которой кроме освещения городов и дорог зафиксированы огни нефтегазовых факелов, лесных и травяных пожаров, прожекторов ночного лова рыбы. Для России в целом представлены фотокарты (сочлененные из снимков на нескольких витках компо-

зитные изображения MODIS, очищенные от влияния облаков, теней, различий в условиях наблюдения на разных пролетах спутника), отражающие состояние экосистем суши в разные сезоны года – зимой и летом. Другая фотокарта, показывающая земельные покровы России, представляет собой часть глобальной карты GLC (Global Land Cover), ее легенда включает 17 типов покровов, распространенных на территории нашей страны. Дистанционный мониторинг продукционных процессов экосистем, развития фитомассы осуществляется на основе определяемого по снимкам показателя «вегетационного индекса» NDVI, поэтому в атлас включены фотокарты сезонных изменений NDVI. Современный растительный покров России охарактеризован на детальной фотокарте, для создания которой по снимкам MODIS с привлечением более детальных снимков разработан специальный метод локально-адаптивной классификации [Барталев и др., 2011].

Вторую группу составляют снимки, используемые в качестве *дополнения к картам*, визуализирующие отображаемые на картах объекты. Такое дополнение играет важную роль для лучшего понимания традиционных карт атласа. Примером служит ландшафтная карта. На включенных в атлас снимках со спутника Landsat даны характерные примеры изображения всех основных типов ландшафтов в точном соответствии с легендой карты. На рис. 1 приведены фрагменты снимков для субарктических, бореальных и суббореальных ландшафтов равнин, иллюстрирующие: типичные тундровые ландшафты (средняя часть полуострова Ямал) (рис. 1, а); южнотаежные восточноевропейские ландшафты (Ярославская область, бассейн р. Костромы) (рис. 1, б); степные типичные восточноевропейские ландшафты (Среднерусская возвышенность, Воронежская область) (рис. 1, в); пустынные прикаспийские (Чеченская республика, Ногайские пески) (рис. 1, г).

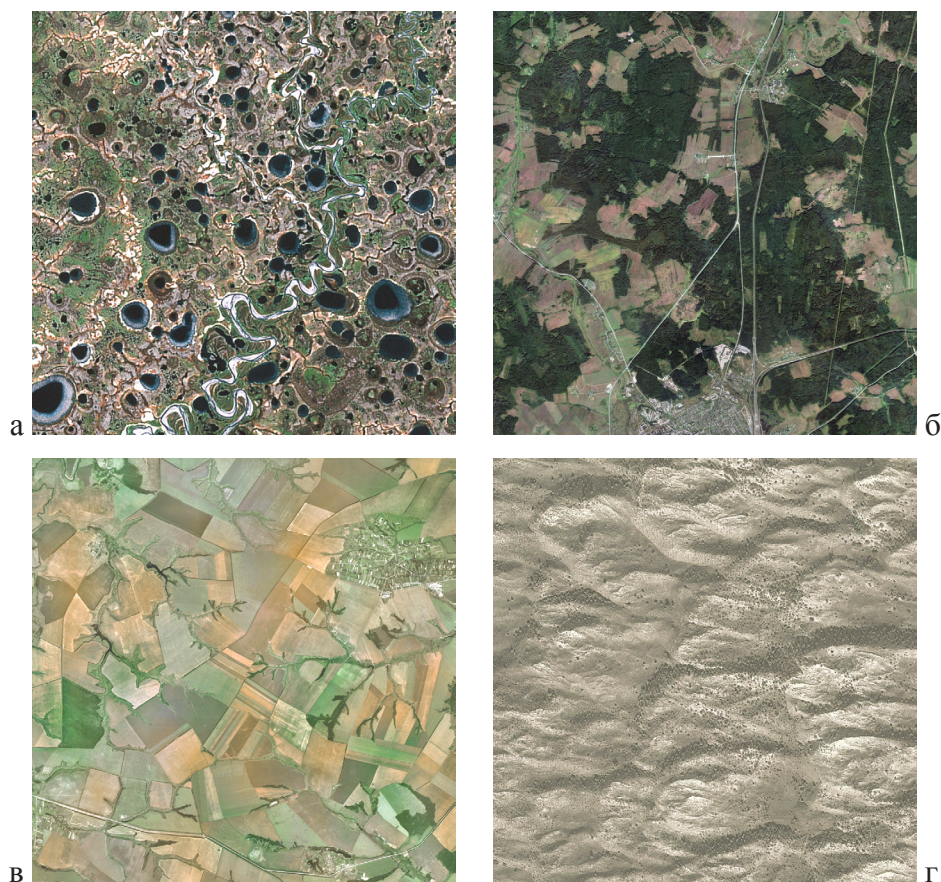


Рис. 1. Изображение некоторых типов ландшафтов на космических снимках
 Fig. 1. Image of some types of landscapes at satellite pictures

Особенно ценно подобное дополнение для карты такого показателя, как структура почвенного покрова. Названия выделяемых структур в легенде, иногда довольно сложные, не позволяют пространственно представить особенности этих структур на местности, а снимки успешно решают эту задачу. На рис. 2 представлены примеры изображения на снимках полигонально-валиковых структур криогенных комплексов на Южном Таймыре (рис. 2, а), линейных грядовых и мелкопятнисто-западинных структур на Приобском плато (рис. 2, б), древовидных (эрозионных) и спорадически пятнистых агрогенно модифицированных структур на Среднерусской возвышенности (рис. 2, в), высотно-дифференцированных кольцевых вулканогенных структур на Камчатке (рис. 2, г).

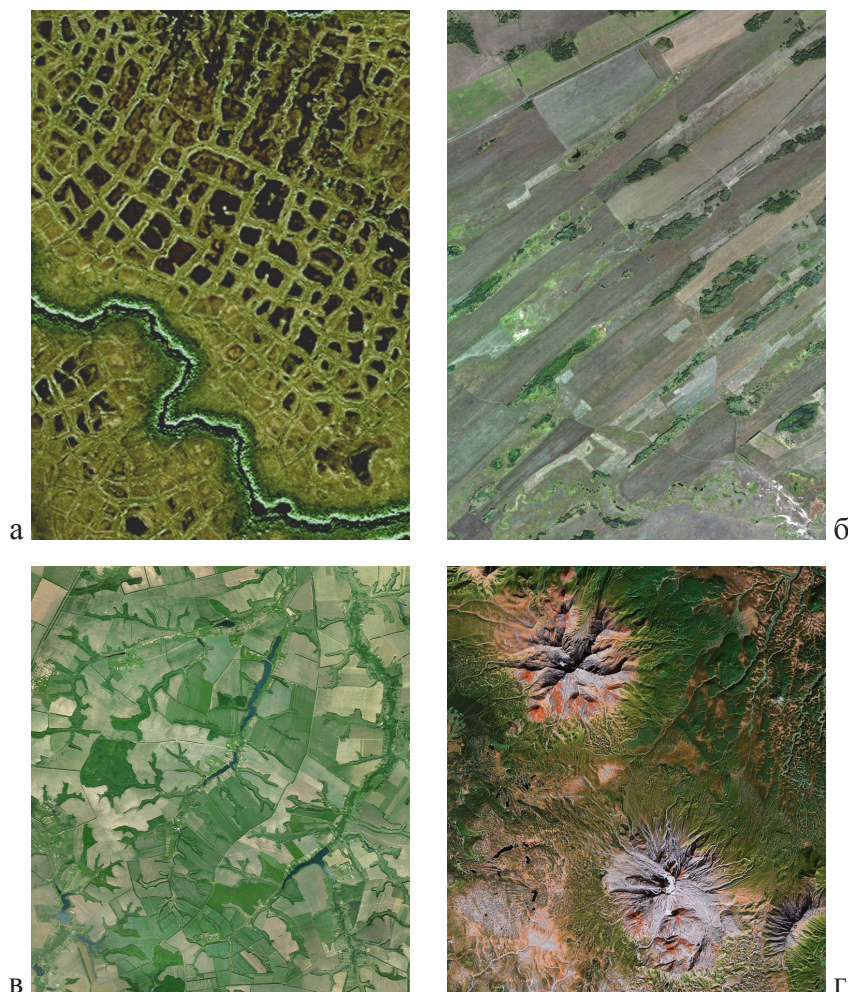


Рис. 2. Отображение некоторых типов структур почвенного покрова на космических снимках

Fig. 2. Image of some types of soil cover structures at satellite pictures

К третьей группе относятся снимки, отражающие **воздействие хозяйственной деятельности** на природу во всех ее средах – загрязнение воздуха и вод, нарушения и загрязнение поверхности, особенно при добыче разнообразных полезных ископаемых. Специальная подборка снимков показывает источники антропогенного воздействия. Загрязнение воздуха проиллюстрировано снимками Landsat и GeoEye с дымовыми факелами промышленных предприятий в Подмосковье и Москве, над которой в ясную зимнюю погоду клубятся дымы 11 ТЭЦ. Четко отражается оно и в загрязнении снежного покрова вокруг городов центральной части Европейской России на обзорных снимках среднего разрешения с метеорологического

спутника. Загрязнение вод показано на примере участка «полосатой» Ангары со струями мутной воды вдоль левого берега из-за активных лесозаготовок и молевого сплава древесины и вдоль правого в связи с разработкой золоторудного рассыпного месторождения. А для оз. Имандра на Кольском полуострове приведен пример благотворного влияния перехода горнообогатительного предприятия по добыче апатитов в Хибинах на внутренний водооборот. Сравнение снимков со спутника Landsat, полученных в 1978 г., со снимками Ресурс-Ф, сделанными после этого перехода, в 1984 г., показывает резкое уменьшение загрязнения озера.

Специальная подборка снимков посвящена состоянию лесной растительности, ее нарушенности, причинам гибели лесов. В качестве главной причины рассмотрены лесные пожары. На снимках показаны дымовые факелы на территориях массового возгорания лесов в Западной Сибири. На примере участка в Магаданской области по серии разновременных снимков Landsat прослежено зарождение, развитие и последствия лесного пожара. Проиллюстрирована возможность долговременного мониторинга лесов, поврежденных насекомыми-вредителями, например, сибирским шелкопрядом в Красноярском крае. Показано отображение сухостойных лесов, поврежденных короедом-типографом, на космических снимках очень высокого разрешения.

Большой массив снимков высокого разрешения иллюстрирует нарушения природной среды при горной добыче, разработке месторождений полезных ископаемых (рис. 3). Показано воздействие на природу в процессе нефтедобычи в Западной Сибири (рис. 3, а), Коми, Башкирии, Татарстане, на Дальнем Востоке и на шельфе Арктики (рис. 3, б), при добыче угля в Кузбассе (рис. 3, в), на Северном Урале и Дальнем Востоке, железной руды в КМА и на Урале, апатито-нефелиновой руды в Хибинах, золота и алмазов в Якутии (рис. 3, г).

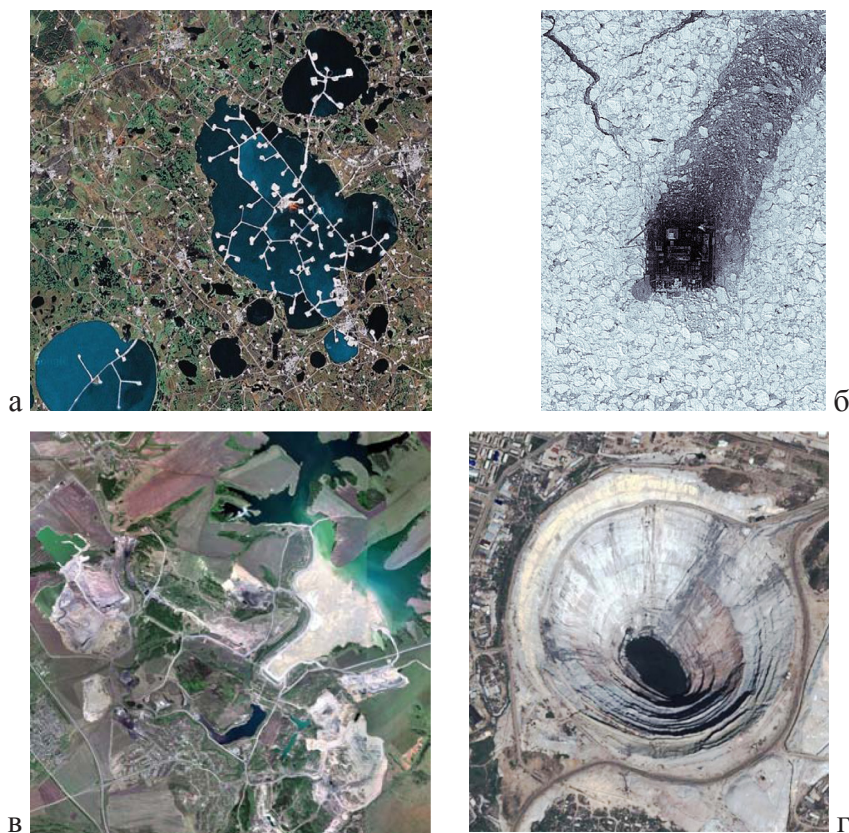


Рис. 3. Отражение воздействия на природную среду при добыче полезных ископаемых

Fig. 3. Reflection of impact at environment under mineral exploration

И, наконец, *четвертую группу* составляют снимки, показывающие плачевные *результаты антропогенного воздействия*, в первую очередь, в промышленных городах (рис. 4).



Рис. 4. Экологические проблемы промышленных городов

Fig. 4. Ecological problems in industrial towns

Две последние группы ввиду их особой важности наиболее разнообразны и многочисленны. Воздействие черной металлургии показано в Нижнем Тагиле, где предприятия горно-металлургического комбината занимают центральную часть города, а Горбуновский карьер открытой добычи руды вклинивается в его территорию. Влияние цветной металлургии хорошо видно в Ачинске с его глиноземным комбинатом, окруженным гроздьями «красного шлама» (рис. 4, а), тонкозернистый осадок которых загрязнен щелочью и представляет опасность для окружающей природы и человека. Влияние энергетики показано на примере Рефтинской ГРЭС в Свердловской области (рис. 4, б), – крупнейшей тепловой электростанции России, работающей на экибастузском каменном угле; труба этой ГРЭС высотой 330 м – одна из высочайших в мире – хотя и обеспечивает высокую степень рассеивания выхлопов, все же не спасает от загрязнения окружающие почвы, растительность и воды. Проблемы на предприятиях химической промышленности ярко проявились на снимках г. Дзержинского на Оке вблизи Нижнего Новгорода, где отходы химического производства сконцентрированы в шламовом озере, прозванном Белым морем (рис. 4, в). В г. Березники, расположенном на шахтных выработках одного из богатейших в мире Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей, разрабатываемого с XVII в., возникла опасность проседания грунта и образования провалов, которые происходили в 1986, 2007, 2010, 2011 гг.;

снимки показывают некоторые из них. На примере промышленности строительных материалов в г. Асбесте показано, что такое производство может быть и экологически чистым (рис. 4, г). Карьер по добыче хризотил-асбеста вынесен за пределы поселка, а большие зоны отвалов вскрышных пород удалены от города и рекультивируются, зарастая мелкоколесьем.

В атласе особо выделены промышленные города экологически уязвимых районов Севера – Кировск, Мончегорск, Воркута, Норильск. Для Норильска космические снимки показывают распространение ядовитых сернокислых дымов никелеплавильных и медноплавильных заводов, гибель лесов под их воздействием, опасное перемещение техногенных отвалов породы. Представлена составленная по снимкам Landsat фотокарта повреждений растительности в окрестностях Норильска. Для Мончегорска по снимкам Landsat 1970–1990-х гг. прослежена деградация экосистем и с учетом полевых и аэровизуальных наблюдений и геохимических исследований [Экология Севера..., 2003] составлены карты промышленного воздействия на растительность.

Космические снимки в атласе отражают и еще одну проблему городов – процессы урбанизации. Сравнительный анализ снимков 1991 и 2001 гг. показал темпы роста застройки на территории ближнего Подмосковья в период начала бурного загородного строительства. Составленные на эти годы карты иллюстрируют рост площадей пригородной застройки в полтора раза и отражают состояние экологического каркаса территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новое издание Экологического атласа России представляет собой первый опыт широкого оснащения тематического атласа космическими снимками, играющими не только иллюстративно-познавательную роль, но дополняющими и раскрывающими содержание экологических карт. По части сюжетов обработанные космические снимки в виде тематических фотокарт включены в атлас на правах карт. Космическое сопровождение, несомненно, будет способствовать лучшему пониманию экологических проблем, широкому привлечению к ним общественности, определению правильных путей их решения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы по оснащению Экологического атласа России космическими снимками были поддержаны грантом РГО № 28/07/2012.

ACKNOWLEDGEMENTS

Study for rigging of Ecological atlas of Russia with satellite images were supported by RGS grant No 28/07/2012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 285–302.
2. Барталев С.А., Лупян Е.А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 197–214.
3. Битюкова В.Р. Эколого-экономическая оценка антропогенного воздействия / Регионы и города России: интегральная промышленная оценка экологического состояния. М.: ИП Филимонов, 2015. С. 13–200.

4. *Касимов Н.С., Котова Т.В., Тикунов В.С.* Экологический атлас России: новый проект // Материалы Междунар. конф. «Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт» ИнтеркартоИнтерГИС-17. Барнаул, 2011. С. 277–282.
5. *Кравцова В.И.* Новый ракурс проблемы «разрешение-охват» в дистанционном зондировании: тематическое картографирование на базе GoogleEarth / Картография в цифровую эпоху. Сер. Вопросы географии. Т. 144. М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. С. 392–407.
6. *Экология Севера: дистанционные методы изучения нарушенных экосистем (на примере Кольского полуострова).* М.: Научный мир, 2003. 248 с.

REFERENCES

1. *Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A.* Satellite mapping of Russia vegetation cover by MODIS spectroradiometer data. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2011. T. 8, No 4. P. 285–302 (in Russian).
2. *Bartalev S.A., Lupyan E.A.* IKI RAS investigations and working-out in development for satellite monitoring of vegetation cover. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2013. T. 10, No 1. P. 197–214 (in Russian).
3. *Bitukova V.R.* Ecological-economical estimation of anthropogenic damage. *Regiony i goroda Rossii – integralnaya promyshlennaya ocenka ehkologicheskogo sostoyaniya*. М.: IP Filimonov, 2015. P. 13–200 (in Russian).
4. *Ecology of the north: remote sensing of ecosystems disturbance (case study of Kola Peninsula).* М.: Nauchnyj mir, 2003. 248 p. (in Russian).
5. *Kasimov N.S., Kotova T.V., Tikunov V.S.* Ecological atlas of Russia: the new project. *Materialy mezhdunarodnoj konferencii "Ustojchivoe razvitie territorij: teoriya GIS i prakticheskij opyt" Interkarto/interGIS-17*. Barnaul, 2011. P. 277–282 (in Russian).
6. *Kravtsova V.I.* A new turn of "resolution-swath" problem in remote sensing: thematic mapping based at Google-Earth. *Kartografiya v cifrovuyu ehphu*. Seriya "Voprosy geografii". T. 144. М.: izdatelskij dom "Kodeks", 2017. P. 392–407 (in Russian).

Иванова А.А.¹, Балдина Е.А.²

ИССЛЕДОВАНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Транспорт занимает одно из ведущих положений среди отраслей экономики страны, обеспечивая территориальную связность. Однако все возрастающее количество путей сообщения и перемещающихся по ним средств транспорта ведет к росту загрязнения прилегающих территорий. Воздействие транспорта на среду исследуется главным образом с позиции загрязнения атмосферы и почвы с применением наземных обследований, методов химического анализа проб почв и воды, моделирования распространения загрязняющих веществ и др., роль данных дистанционного зондирования невелика. Оценка возможностей регистрации тепловой космической съемкой исходящего длинноволнового излучения крупных транспортных узлов и выявления закономерностей пространственно-временных изменений теплового излучения на их территориях выполнена для нескольких железнодорожных транспортных узлов. Использованы разносезонные снимки, полученные радиометром TIRS со спутника Landsat-8 в 2014–2017 гг. Обработка снимков проводилась в программном комплексе ArcGIS. Она включала предварительную обработку дистанционных данных теплового диапазона, вычисление по стандартной формуле температуры поверхности и создание растровых изображений теплового поля; совмещение полученных изображений пространственного распределения температуры поверхности со снимком высокого разрешения в оптическом диапазоне и создание на этой основе временных рядов изображений тепловых полей для нескольких транспортных, главным образом, железнодорожных узлов. Устойчивые тепловые аномалии оказалось возможным выявить при сложении разносезонных снимков с помощью инструмента Взвешенный оверлей (Weighted overlay). Получены и проанализированы разносезонные изображения железнодорожных транспортных узлов, представляющих пространственно-временную динамику интенсивности их теплового излучения. Тепловая аномалия железнодорожного узла составляет превышение поверхностной температуры на 2–5 °С относительно среднего фоновое значения. При этом железнодорожные узлы заметно выделяются на фоне окружающих территорий при отсутствии рядом с узлом действующих промышленных предприятий (Ржев, Архангельск), плотной городской застройки (Москва, Архангельск) или выбросов теплых сточных вод (Брянск), тепловой фон которых иногда существенно превышает излучение железнодорожных объектов. Возможности применения тепловых космических снимков для выявления теплового загрязнения, создаваемого транспортными узлами, ограничены, поскольку пространственного разрешения 100 м (наиболее высокое для современных тепловых космических снимков) часто недостаточно для обнаружения тепловой аномалии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космические снимки, тепловой инфракрасный диапазон, железнодорожные узлы, сезонные изменения, тепловое загрязнение.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: ania.ivanova96@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: baldina@geogr.msu.ru

Anna A. Ivanova¹, Elena A. Baldina²

THE RESEARCH AND MAPPING OF THE THERMAL IMPACT OF RAILWAY TRANSPORT NODES ON THE ENVIRONMENT FROM REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

Transport occupies one of the leading positions among the sectors of the country's economy, providing territorial connectivity. However, an increasing number of communication routes and vehicles moving along them, lead to an increase in pollution of adjacent territories. The impact of transport on the environment is mainly studied from the point of pollution of the atmosphere and soil with the use of ground surveys, methods of chemical analysis of soil and water samples, modeling the spread of pollutants, etc., the role of remote sensing data is low. The research aimed at an assessment of the possibilities for recording the outgoing long-wave radiation of large transport junctions by satellite thermal imagery and revealing the patterns of spatiotemporal changes in thermal radiation from their territories for several railway transport junctions. Images acquired at different seasons by the TIRS radiometer (Landsat-8) in 2014–2017 were used. The images were processed using the ArcGIS software package. The whole work flow chart included several stages, i.e. preliminary processing of thermal remote sensing data, calculation surface temperature for each pixel and the creation of raster images of the thermal field; the combination of the calculated images of the surface temperature spatial distribution with a high-resolution image in the optical range and the creation on this basis of time series images of thermal fields for several transport, mainly railway, nodes; the analysis of the resulting maps. It appeared that stable thermal anomalies can be revealed by combining the temperature images of different seasons using the Weighted overlay tool. Thus, the multi-season temperature images of railway transport nodes, representing the space-time dynamics of the of thermal radiation intensity, were obtained and analyzed. The thermal anomaly of the railway node is an excess of the surface temperature by 2–5 °C relative to the average background value. At the same time, the railway junctions are markedly distinguished against the background of the surrounding territories in the absence of existing industrial enterprises (Rzhev, Arkhangelsk), dense urban development (Moscow, Arkhangelsk) or warm wastewater discharges (Bryansk) near the node, whose thermal background sometimes significantly exceeds the radiation of railway facilities. The possibilities of using satellite thermal images to detect thermal pollution created by transport nodes are limited, since a spatial resolution of 100 m (the highest for modern satellite thermal images) is often not enough to detect a thermal anomaly.

KEYWORDS: satellite images, thermal infrared band, railway nodes, seasonal changes, thermal pollution.

ВВЕДЕНИЕ

Транспорт – одна из важнейших отраслей народного хозяйства и одно из необходимых условий производства, он является крупнейшей системообразующей отраслью, имеющей тесные связи со всеми элементами экономики и социальной сферы. По мере дальнейшего развития страны, расширения ее внутренних и внешних транспортно-

¹ Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* ania.ivanova96@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* baldina@geogr.msu.ru

экономических связей, роста объемов производства и повышения уровня жизни населения значение транспорта и его роль как системообразующего фактора будут только возрастать. Протяженность путей сообщения транспортной системы России по состоянию на 2017 г. составляла 86 тыс. км железных дорог общего пользования, 42 тыс. км путей промышленного железнодорожного транспорта, 755 тыс. км автомобильных дорог с твердым покрытием, 102 тыс. км внутренних водных путей. Железнодорожный транспорт занимает важное место в транспортной системе, выполняет 62 % общего объема грузовых перевозок, осуществляемых транспортом общего пользования, или 84,3 % общего грузооборота, осуществляемого всеми видами транспорта (без учета трубопроводного)¹. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. предусматривает рост объемов грузовых перевозок и значительное уменьшение вредного воздействия транспорта на окружающую среду: к 2030 г. предполагается сократить объем выбросов и сбросов загрязняющих вредных веществ от автотранспортного комплекса на 40 %, на железнодорожном транспорте – более чем в 3 раза.

Транспорт относится к важным загрязнителям: его воздействие на экосистемы выражается: в загрязнении атмосферы, водных объектов и земель, изменении химического состава почв и микрофлоры, образовании производственных отходов, в том числе токсичных и радиоактивных, шламов, замазученного грунта, котельных шлаков, золы и мусора [Павлова, 2006]. Под действием транспортных загрязнений происходят деградация и гибель экосистем, особенно на участках наиболее концентрированного воздействия, в первую очередь, на урбанизированных территориях. Остро стоит проблема утилизации и переработки отходов, возникающих при эксплуатации транспортных средств, в том числе и при завершении срока их службы. Для нужд транспорта в большом количестве потребляются природные ресурсы.

Железнодорожный транспорт имеет определенные преимущества с точки зрения воздействия на окружающую среду перед остальными его видами благодаря высокой эффективности использования энергоресурсов; меньшей потребности в занимаемых площадях; меньшем объеме выбросов вредных веществ [Пургина, Колькова, 2014; Пронин, 2016 и др.]. При этом объекты железнодорожного транспорта потребляют большое количество разнообразных видов топлива (угля, газа, дизельного топлива, бензина и др.), которое используется для обеспечения производственных процессов, отопления и работы подвижного состава. Строительство и эксплуатация железных дорог оказывают значительное влияние на экологическое состояние окружающей природной среды, сопровождающееся изменением геохимического, теплового и других полей, а также развитием или активизацией комплекса экзогенных геологических процессов, изменением подземной и поверхностной гидросферы, формированием техногенных форм рельефа [Киселёва, 1999]. Негативное воздействие транспорта на прилегающие территории широко исследуется в разных странах, поскольку железная дорога все же загрязняет окружающую среду в результате выбросов вредных химических веществ и пыли, а также шумом. Эти обстоятельства привлекают внимание к разработке подходов к решению экологических проблем в транспортном комплексе.

Помимо хорошо известных видов воздействия транспорта на окружающую среду необходимо отметить и тепловое загрязнение, когда температура поверхности территории увеличивается, по сравнению с прилегающей местностью. Тепловое загрязнение представляет собой повышенное выделение тепла в окружающую среду, вызванное

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г., http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&S

сжиганием ископаемых углеводородов (нефть, газ, уголь, торф), тепла, выделяемого работающими механизмами, использованием материалов с высокой теплоемкостью, а также повышенным уровнем теплового излучения за счет нагрева солнечными лучами поверхности, лишенной растительного покрова. Транспорт вносит существенный вклад в формирование городского острова тепла на урбанизированных территориях. Тепло, выделяемое транспортными средствами, накапливается в плохо вентилируемых городских зонах, ухудшая состояние атмосферы [Mayer et al., 2012; Haddad, Aouachria, 2015].

Возможность выявления теплового загрязнения урбанизированных территорий и характеристики городских островов тепла по космическим снимкам в тепловом инфракрасном диапазоне известна несколько десятилетий [Voogt, Oke, 2003; Грищенко, 2013]. Однако исследование теплового воздействия именно транспортных систем на основе тепловых аэро- и космических съемок не проводилось.

Цель проведенного исследования состоит в оценке возможностей регистрации тепловой космической съемкой исходящего длинноволнового излучения крупных транспортных узлов и выявление закономерностей пространственно-временных изменений теплового излучения на их территориях.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние железнодорожного транспорта на окружающую среду проявляется уже в момент начала строительства железной дороги. Факторами, влияющими на окружающую среду при сооружении земляного полотна, являются: нарушение занимаемых земель, загрязнение воздуха, загрязнение водоемов и строительных площадок. К числу основных составляющих воздействия железнодорожного транспорта на окружающую среду, которые исследуются наиболее часто, относятся ингредиентные загрязнители, формируемые как самим подвижным составом, так и перевозимыми грузами, электромагнитные поля и шум подвижного состава. Стационарные источники загрязнения – предприятия, обеспечивающие ремонт транспортных средств, вспомогательные производства, здания и сооружения хозяйственно-бытового назначения (котельные, вокзалы, топливные склады и т. д.), места стоянок транспорта. Среди стационарных объектов, больше всего влияющих на окружающую среду, авторы [Plakhotnik et al., 2005] выделяют такие предприятия как промывочно-пропарочные станции, локомотиво- и вагоноремонтные заводы, заводы по ремонту путевой техники, щебеночные заводы, шпалопропиточные заводы, грузовые и сортировочные станции, котельные, локомотивные и вагонные.

Наиболее распространенными загрязнителями территорий железнодорожных предприятий являются органические вещества и продукты их сгорания (нефть, нефтепродукты, мазут, топливо, смазочные материалы, полициклические ароматические углеводороды) и тяжелые металлы (железо, марганец, свинец, медь, цинк, кобальт и др.). Достаточно крупные и длительное время действующие железнодорожные узлы и их линейные подразделения оказывают влияние на относительно большие прилегающие территории, на расстоянии до 550–1000 м от железнодорожного полотна [Павлова, 2006].

Большое значение имеет определение пространственного распространения загрязнений, формируемое железнодорожными предприятиями, которое зависит от очень многих факторов. Наиболее точным методом является геохимический анализ проб почв, взятых на разном расстоянии от железнодорожного полотна. Авторами, проводившими исследования почвы в окрестностях железнодорожных объектов г. Москвы [Макаров и др., 2013], было установлено значительное повышение концентрации загрязняющих веществ – нефтепродуктов, бенз(а)пирена, свинца и меди – в почвах в ближней зоне

и ее понижение при отстоянии до 50 м. В исследованиях распространения загрязнения почв тяжелыми металлами в Сербии [Stojic et al., 2017] на основе химического анализа проб, отобранных на разном расстоянии от железнодорожного полотна, было установлено, что концентрация таких металлов как кобальт и никель уменьшается постепенно при удалении от железнодорожного полотна и присутствуют на расстоянии более 1 км. Исследование распространения угольной пыли при транспортировке угля [Akaoka et al., 2017] показало присутствие частиц угольной пыли разного размера в прилегающей полосе шириной до 50 м.

В нашем исследовании сделана попытка определить степень распространения загрязнения на основе космических снимков в тепловом диапазоне, на которых возможно выделение участков повышенной относительно фона температуры поверхности, т. е. выявить тепловое загрязнение, формируемое железнодорожным транспортом, имеющими заметное для тепловых космических снимков площадное распространение. Собственно полотно железнодорожного пути занимает полосу обычно 10–30 м, но магистральная железнодорожная линия в зависимости от категории требует в пределах перегонов полосы отвода до 100–150 м шириной, а железнодорожные станции со всеми сооружениями в их границах и службами, занимают значительно большие площади. Так, крупные сортировочные станции размещаются на площадках шириной до 300–500 м и длиной 4–6 км. Необходимость сооружения пересечений (железнодорожных линий между собой и с другими путями сообщения) в разных уровнях с применением больших радиусов и малых уклонов на пересекающихся коммуникациях делает железнодорожные развязки весьма емкими по площади [Аксенов И.Я., Аксенов В.И., 1986].

На начальном этапе были проанализированы снимки с изображением наиболее крупных транспортных узлов, например, в пределах Москвы, однако мощный городской остров тепла большого города не позволил выявить в его пределах тепловую аномалию, создаваемую железнодорожным транспортом. В качестве территорий для исследования выбраны 8 транспортных узлов – Бекасово Троицкого округа Москвы; железнодорожные узлы городов: Рыбное (Рязанской обл.), Дружинино (Свердловской обл.), Ржев и Бологое (Тверской обл.), Архангельск, Брянск, Рузаевка (Мордовия). Выбор этих тестовых узлов был обусловлен их расположением в разных климатических и экономических условиях, за пределами крупных городов и наличием безоблачных снимков на несколько сезонов года. Выбранные узлы характеризуются большим грузо- и пассажирооборотом, что является признаком их высокой активности. Активность узлов в свою очередь свидетельствует о том, что они формируют тепловые аномалии.

МАТЕРИАЛЫ

Для исследования теплового загрязнения транспортных узлов необходимы космические снимки наиболее высокого пространственного разрешения, ввиду того, что транспортные объекты, особенно железные дороги, имеют относительно небольшую ширину. В настоящее время наиболее высокое пространственное разрешение в тепловом диапазоне имеют снимки, получаемые радиометром TIRS в двух каналах (10,30–11,30 и 11,50–12,50 мкм) со спутника Landsat-8 – 100 м.

Для исследования были отобраны снимки из новой коллекции с портала Геологической службы США (U.S. Geological Survey), уровня обработки T1 с наивысшим доступным качеством данных [Earthexplorer.usgs.gov]. В отличие от других съемочных систем снимки TIRS/Landsat 8 не нуждаются в дополнительной калибровке, и их пространственное разрешение подходит для такой задачи, как определение яркостных температур поверхности транспортных узлов и прилегающих территорий. Для более детального изучения террито-

рий узлов и окружающих природных и городских территорий привлекались снимки высокого разрешения сервиса Google Earth. Данные этого уровня обработки радиометрически калиброваны и считаются пригодными для анализа временных рядов. Точность взаимной пространственной привязки разновременных данных, характеризуемая величиной круговой среднеквадратической ошибки, оценивается в ≤ 12 м (RMSE) для видимого диапазона и в 40 м для данных TIRS [<https://landsat.usgs.gov/landsat-collections>].

При подборе снимков предпочтение отдавалось изображениям, на которых в пределах рассматриваемых территорий отсутствовали облачность, туман, смог. Другим фактором отбора стал сезон года. Первостепенное значение придавалось зимним снимкам в предположении, что тепловое излучение, создаваемое работающими механизмами, и формируемое ими тепловое загрязнение, должны наиболее отчетливо проявиться зимой при низкой высоте солнца и минимальном влиянии теплового излучения, обусловленного нагревом солнечными лучами. Для выявления сезонной динамики дополнительно привлекались снимки других сезонов (табл.).

Даты и условия съемки выбранных территорий
Dates and conditions of images acquirement for the selected territories

Дата съемки	Температура воздуха, °С	Высота Солнца, °	Дата съемки	Температура воздуха, °С	Высота Солнца, °
Бекасово			Ржев		
31.01.14	–15	15,4	17.02.2015	–5,8	30,2
29.03.14	–0,6	36,1	27.03.2014	+6,2	46,7
24.07.14	+25,9	56	21.05.2014	+20,2	52,9
21.09.14	+16,9	33,9			
Брянск			Рыбное		
08.02.17	–16,6	19,9	08.02.2016	–3,2	18,5
18.04.13	+17,7	46	27.03.2016	+5,9	36,5
05.06.13	+25,2	57,3	14.05.2016	+15,9	52,5
12.09.14	+21	39,5			
Рузаевка			Дружинино		
26.02.18	–18,3	16,5	13.02.2016	–4,7	12,4
11.03.17	+2,6	38	30.03.2015	+0,8	43,3
14.07.16	+26,2	54,4	03.05.2016	+16,3	47,3
21.09.15	+20	40,2			
Бологое			Архангельск		
17.02.17	–14,6	15,6	06.02.2017	–23,9	9,6
23.03.16	+4,5	35	06.04.2015	8,2	31,8
03.06.13	+22,4	50,3	29.05.2016	20,2	46,9
25.09.17	+19	38,6			

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вычисление яркостных температур. На первом этапе обработки создавались изображения распределения вычисленной температуры поверхности. Преобразование исходных числовых значений яркости снимка в яркостные температуры поверхности позволяет более обоснованно сравнивать различия в интенсивности теплового излучения компонентов

транспортных узлов и прилегающих к ним территорий, а также узлы между собой. Вычисления осуществлялись на основе стандартного приближенного метода с использованием одного канала (10 канал), который предлагается разработчиками [<https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>]:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)},$$

где все параметры, необходимые для расчета L_λ – спектральной плотности энергетической яркости на верхней границе атмосферы и радиояркостной температуры T (коэффициенты K_1 и K_2), приводятся в метаданных каждого снимка. Для осуществления автоматизированного вычисления температур использовался программный продукт ArcGIS 10.5. Ввиду малых размеров исследуемых участков атмосферная коррекция результата вычисления температуры не проводилась. Некоторые результаты этого этапа – изображения распределения яркостных температур в градусах Цельсия на выбранные территории представлены на рис. 1. Нетрудно заметить превышение температуры поверхности всех этих железнодорожных узлов относительно фона, которое составляет не менее 2–5 °С.

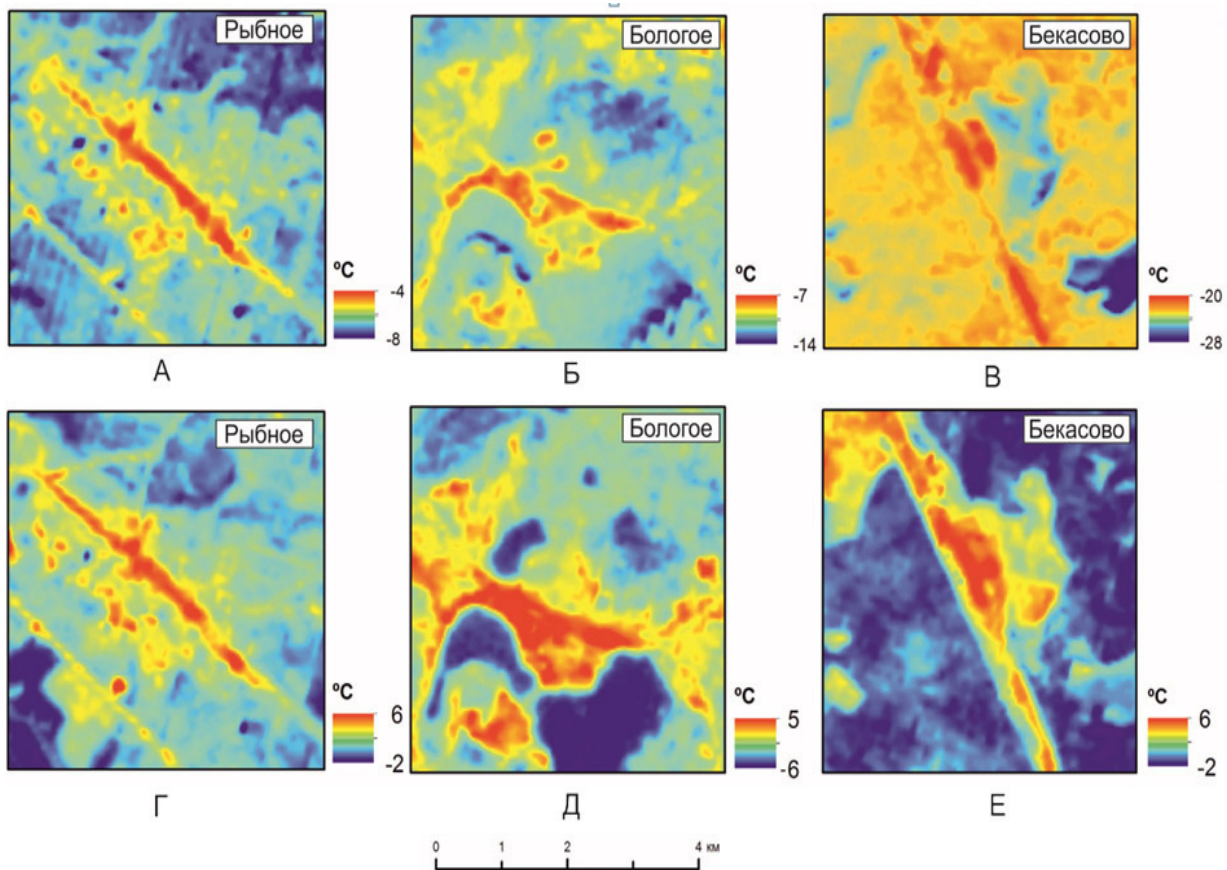


Рис. 1. Распределение яркостных температур на территории железнодорожных узлов Бекасово, Рыбное и Бологое в зимний (верхний ряд) и весенний (нижний ряд) периоды; А – 08.02.16, Б – 17.02.17, В – 31.01.14, Г – 27.03.16, Д – 23.03.16, Е – 29.03.14

Fig. 1. Distribution of brightness temperatures through the territory of the railway junctions Bekasovo, Rybnoye and Bologoe in the winter (upper row) and spring (lower row) seasons; А – 08.02.16, Б – 17.02.17, В – 31.01.14, Г – 27.03.16, Д – 23.03.16, Е – 29.03.14

Оверлей изображений распределения яркостных температур. Получение карт тепловых аномалий осуществлялось с помощью инструмента взвешенный оверлей (Weighted overlay), который позволит определить, обладают ли исследуемые транспортные узлы во все рассматриваемые сроки стабильно высокими температурами по сравнению с прилегающими территориями. Есть два основных требования при работе с данным инструментом: входные растровые изображения должны быть целочисленные и переклассифицированы по единой шкале для правильного сопоставления. Переклассификация производилась с помощью гистограмм яркостных температур на каждую исследуемую дату съемки. Всего было выделено 7 градаций температур: 1) минимальные температуры; 2) низкие температуры; 3) температуры ниже среднего; 4) средние температуры; 5) температуры выше среднего; 6) высокие температуры; 7) максимальные температуры.

Разбиение гистограммы производилось методом естественных интервалов (Natural Breaks), в котором границы классов определяются таким образом, чтобы сгруппировать схожие значения и максимально увеличить различия между классами. В ходе выделения указанных выше ступеней температур границам классов присваивались ближайшие целочисленные значения (рис. 2).

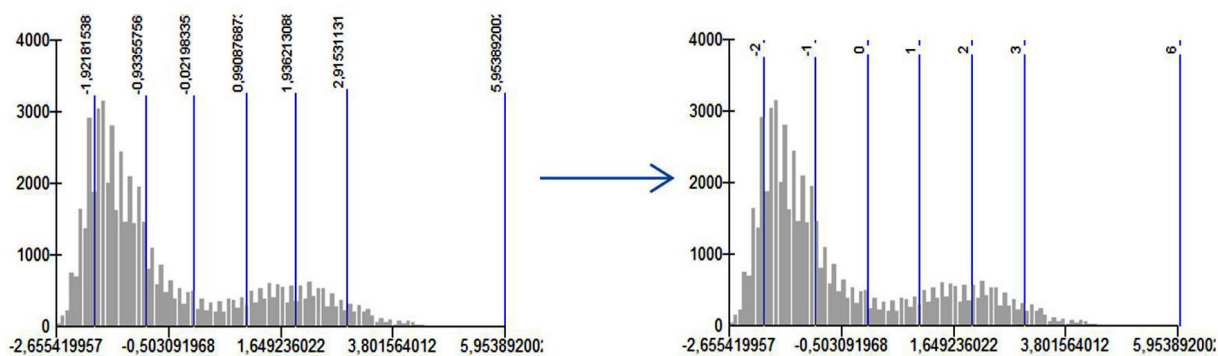


Рис. 2. Пример переклассификации изображения распределения температур территории Бекасово (дата съемки: 29.03.14)

Fig. 2. An example of the reclassification of the temperature image for the territory of Bekasovo (the image date: 29.03.14)

Следующим этапом стало суммирование полученных изображений, состоящих из целочисленных значений классов с помощью взвешенного оверлея. При использовании данного инструмента входным изображениям присваивается вес, который определяет вклад каждого снимка в итоговый растр. Опытным путем было проверено, что оптимальным вариантом является назначение разносезонным снимкам равного веса, тогда распределение суммы температур на результирующем изображении получается более достоверным. При использовании обратной зависимости (чем больше разброс температур на снимке, тем меньше его вес), происходит уменьшение относительных контрастов, а при прямой зависимости (чем больше разброс температур на снимке, тем больше его вес) наоборот контрасты увеличиваются. После процедуры наложения, для всех исследуемых территорий узлов были получены итоговые изображения, представляющие 7 классов суммарных температур (рис. 3).

На последнем этапе создавались карты теплового загрязнения железнодорожных узлов путем совмещения слоя изображений суммарных разносезонных температур и снимков высокого пространственного разрешения, позволяющих точно соотнести тепловые аномалии с хорошо различимыми объектами и постройками (рис. 4).

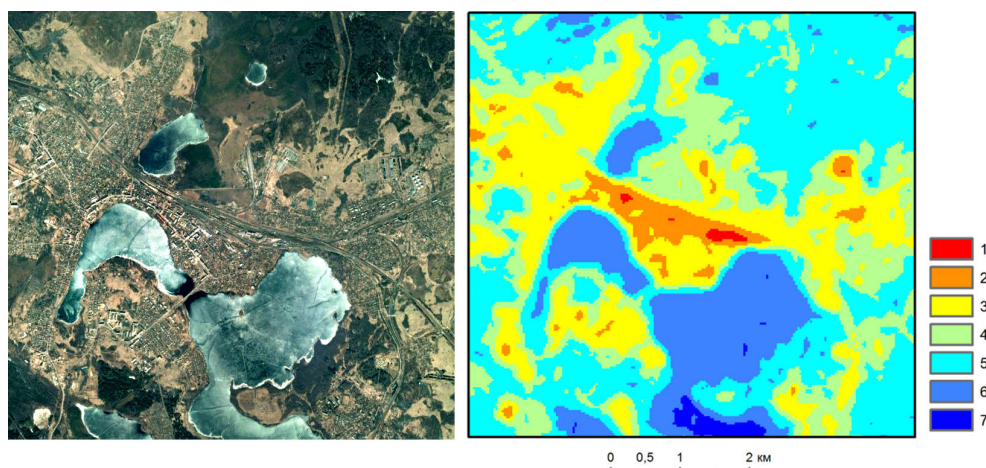


Рис. 3. Детальный снимок железнодорожного узла Бологое и результат взвешенного оверлея изображений температуры поверхности этой территории в разные сезоны:

1 – максимальные температуры, 2 – высокие температуры, 3 – температуры выше среднего, 4 – средние температуры, 5 – температуры ниже среднего, 6 – низкие температуры, 7 – минимальные температуры

Fig. 3. The Bologoye railway junction at the high resolution image (Google Earth) and the result of a weighted overlay of surface temperature multi-seasons images of the same territory:

1 – maximum temperatures, 2 – high temperatures, 3 – temperatures above average, 4 – average temperatures, 5 – temperatures below average, 6 – low temperatures, 7 – minimum temperatures

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные на рис. 4 итоговые изображения железнодорожных узлов позволяют сравнить и проанализировать степень выраженности тепловой аномалии и интенсивность теплового воздействия.

Так, на карте распределения температуры пос. *Дружинино* железнодорожный узел относится к объектам с высокими температурами в большую часть сроков. Максимальные температуры во все исследуемые сроки на территории узла приурочены к пунктам технического обслуживания подвижных составов, по причине теплоотдачи работающих механизмов. Относительно жилой застройки узел выделяется на 2–4 °С. Наибольшие различия наблюдаются зимой, а наименьшие – весной. Между участками территорий, не занятых лесным массивом и узлом, разница температур составляет 3–4 °С. Относительно лесной зоны узел отчетливо выделяется во все исследуемые сроки. Похожие ситуации характерны и для железнодорожных узлов городов *Рыбное* и *Бекасово*, где территории узлов относятся к объектам с высокими и максимальными температурами. Стабильно максимальными температурами обладают как пункты технического обслуживания подвижных составов и локомотивное депо, так и участки железнодорожных путей.

Железнодорожный узел г. *Рыбное* обладает высоким излучением на протяжении всего зимне-весеннего периода, особенно в зоне работающих механизмов. Таким образом, этот узел представляет отчетливо выраженную тепловую аномалию. Тепловая аномалия железнодорожного узла *Бекасово* хорошо выражена в большую часть сроков, поскольку на его территории присутствуют объекты с высокими температурами (путевая машинная станция, сортировочная горка, локомотивное депо). Стабильные максимальные температуры сортировочной горки связаны с теплоотдачей работающих механизмов подвижных составов постоянно перемещающихся по ней. Устойчивая тепловая аномалия этого узла обусловлена его расположением вне крупного города, отсутствием поблизости промышленных предприятий.

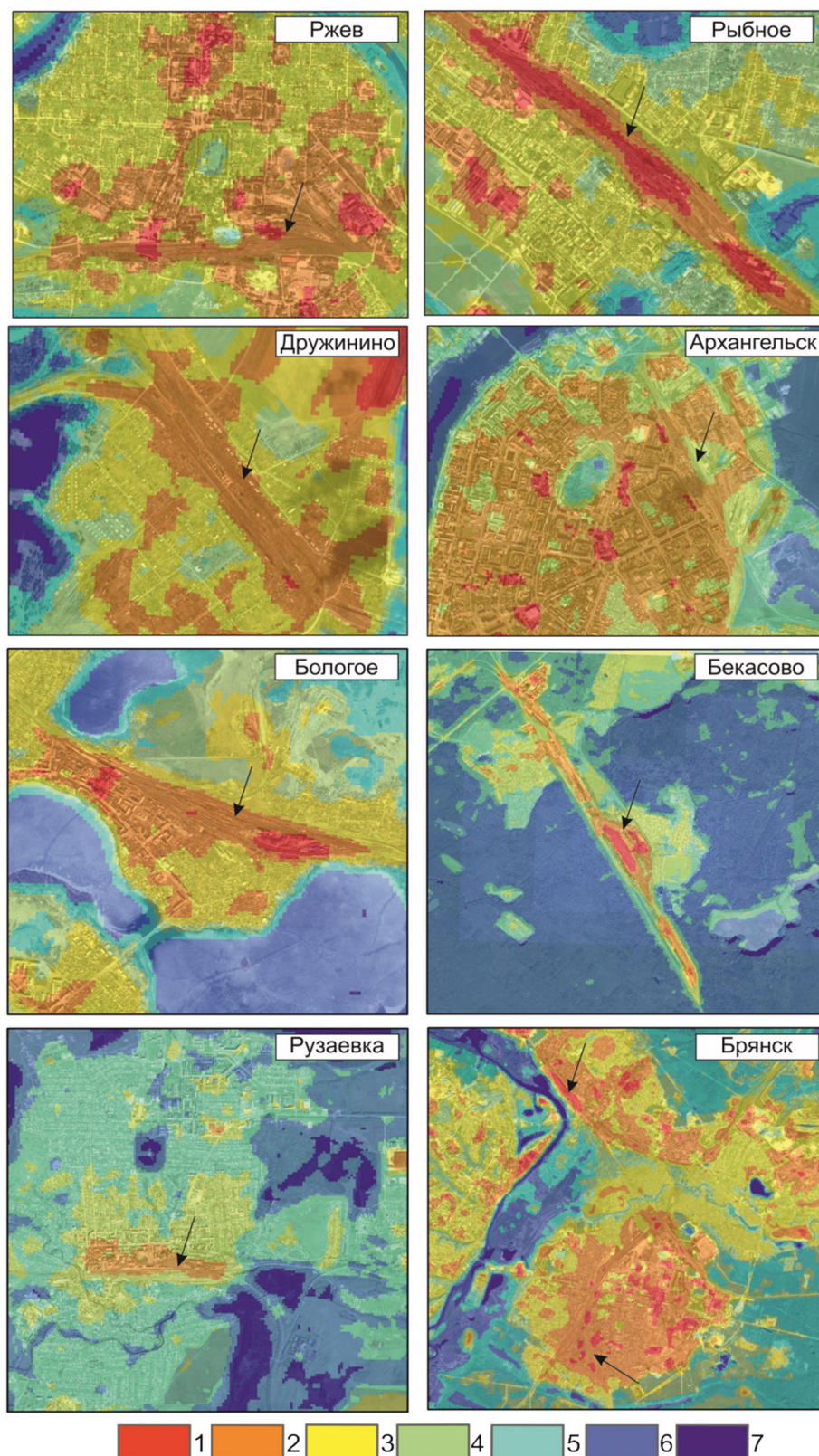


Рис. 4. Карты тепловых аномалий на территории исследованных железнодорожных узлов:
 1 – максимальные температуры, 2 – высокие температуры, 3 – температуры выше среднего, 4 – средние температуры, 5 – температуры ниже среднего, 6 – низкие температуры, 7 – минимальные температуры

Fig. 4. The maps of the studied railway nodes thermal anomalies:
 1 – maximum temperatures, 2 – high temperatures, 3 – temperatures above average, 4 – average temperatures, 5 – temperatures below average, 6 – low temperatures, 7 – minimum temperatures

Железнодорожный узел *Ржев* относится к объектам с высокими температурами в большую часть сроков, однако к тому же классу объектов относится и прилегающая городская застройка, а расположенные рядом промышленные объекты обладают стабильно максимальными температурами. Анализ разнотемпературных снимков позволяет сделать те же выводы, что железнодорожная станция Ржева выделяется относительно окружающих антропогенных объектов слабо, не только зимой, но и в начале весны. Во второй половине мая, когда уже стоит летняя погода и увеличивается инсоляция, наблюдается повышение излучения в местах работающих механизмов (например, в районе депо по ремонту подвижного состава), но железнодорожные пути все еще обладают небольшим уровнем излучения. Относительно природных объектов (лугов и леса) узел хорошо выявляется во все сезоны.

В *Архангельске* наблюдается та же ситуация, что и во Ржеве, железнодорожный узел вместе с прилегающей жилой застройкой относится к объектам с высокими температурами в большую часть сроков, тем самым не выделяясь относительно нее.

Железнодорожный узел *Брянска* не сконцентрирован в одном месте, а разделен на несколько частей, что обусловило в целом его слабую выраженность относительно городской застройки. Исключением являются одна из составляющих узла – станция Брянск-Орловский. К ней приурочены небольшие участки со стабильно максимальными температурами. Причиной этому может являться активное движение подвижных составов по его территории, а также высокая интенсивность излучения локомотивного депо.

Железнодорожный узел *Бологое* относится к объектам с высокими температурами в большую часть сроков. К объектам со стабильно максимальными температурами относятся локомотивное депо и примыкающие к нему здания по техническому обслуживанию составов, что обуславливает их тепловую аномалию. В целом можно отметить, что территория узла хорошо выделяется относительно малоэтажной жилой застройки. Относительно многоэтажной застройки, которая также относится к классу высоких температур, узел не выделяется.

В г. *Рузая* на территории железнодорожного узла присутствуют объекты с высокими температурами в большую часть сроков (железнодорожный вокзал, пункты технического обслуживания составов, веерное депо). В целом, можно сказать, что узел не отчетливо выделяется из-за прилегающей городской застройки, которая также обладает высокими температурами.

Практически для всех узлов тепловое воздействие не распространяется дальше территории узла. Помимо представленных на рис. 4 железнодорожных узлов нами были проанализированы еще несколько узлов, расположенных как на севере – Котлас и Коноша, так и на юге – Армавир, Невинномысск, которые не формировали выраженной тепловой аномалии на доступных снимках. Железнодорожные узлы Московской агломерации представляют сильно выраженную положительную тепловую аномалию, но она не отделима от плотной городской застройки.

ВЫВОДЫ

По космическим снимкам TIRS/Landsat-8 можно выявить тепловое загрязнение, формируемое железнодорожными узлами. Тепловая аномалия железнодорожного узла составляет превышение поверхностной температуры на 2–5 °С относительно среднего фонового значения. Тепловое загрязнение территорий транспортных узлов формируют транспортные средства, находящиеся и передвигающиеся по их территории, а также логистические центры, которые включают в себя складские пункты, где хранятся и обрабатываются грузы, стоянки и пункты технологического обслуживания транспорта. При этом железнодорожные узлы заметно выделяются на фоне окружающих территорий

лишь при отсутствии рядом с узлом действующих промышленных предприятий (Ржев, Архангельск), плотной городской застройки (Архангельск, Рузаевка) или выбросов теплых сточных вод (Брянск), тепловой фон которых иногда существенно превышает излучение железнодорожных объектов. Возможности применения тепловых космических снимков для выявления теплового загрязнения, создаваемого транспортными узлами, ограничены, поскольку пространственного разрешения 100 м (наиболее высокое для современных тепловых космических снимков) часто недостаточно для обнаружения тепловой аномалии, имеющей незначительное превышение температуры поверхности над средними фоновыми значениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов И.Я., Аксенов В.И. Транспорт и охрана окружающей среды. М.: Транспорт, 1986. 176 с.
2. Грищенко М.Ю. Аэрокосмические исследования городского острова тепла. Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2013. 19(1). С. 22–28. DOI: 10.24057/2414-9179-2013-1-19-22-28.
3. Киселева Л.В. Экология железнодорожного транспорта. Учебное пособие. М.: МИИТ, 1999. 165 с.
4. Макаров А.О., Яковлев А.С. Оценка загрязненности почв на территории железнодорожных объектов Москвы // Агрохимический вестник. 2013. № 2. С. 29–32.
5. Павлова Е.И. Экология транспорта. Учебник для вузов. М.: Высш. школа, 2006. 344 с.
6. Пронин А.П. Влияние железнодорожного транспорта на окружающую природную среду // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 4. С. 610–623.
7. Пургина А., Королькова А. Железнодорожный транспорт и окружающая среда // Вестник Юридического института МИИТ. 2014. № 3 (7). С. 75–87.
8. Akaoka K., McKendry I., Saxton J., Cottle P.W. Impact of coal-carrying trains on particulate matter concentrations in South Delta, British Columbia, Canada. Environmental Pollution. April 2017. V. 223. P. 376–383.
9. Haddad L., Aouachria Z. Impact of the transport on the urban heat island. International Journal for Traffic and Transport Engineering. 2015. No 5(3). P. 252–263.
10. Mayer R.M., Poulikakos L.D., Lees A.R., Heutschi K., Kalivoda M.T., Soltic P. Reducing the environmental impact of road and rail vehicles. Environmental Impact Assessment Review. 2012. No 32. P. 25–32.
11. Plakhotnik V.N., Onyshchenko Ju.V., Yaryshkina L.A. The environmental impacts of railway transportation in the Ukraine. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2005. V. 10, No 3. P. 263–268.
12. Stojic N., Puracevic M., Stojic G. Railway transportation as a source of soil pollution. Transportation Research Part D. 2017. No 75. P. 124–129.
13. Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates // Remote Sensing of Environment. 2003. No 86. P. 370–384.

REFERENCES

1. Akaoka K., McKendry I., Saxton J., Cottle P.W. Impact of coal-carrying trains on particulate matter concentrations in South Delta, British Columbia, Canada. Environmental Pollution. April 2017. V. 223. P. 376–383.
2. Aksenov I.Ya., Aksenov V.I. Transport and environmental protection. M.: Transport, 1986. 176 p. (in Russian).

3. *Grishchenko M.Yu.* Urban heat island aerospace studies. Proceedings of the International conference "InterCarto/InterGIS". 2013. 19 (1). P. 22–28 (in Russian).
4. *Haddad L., Aouachria Z.* Impact of the transport on the urban heat island. International Journal for Traffic and Transport Engineering. 2015. No 5 (3). P. 252–263.
5. *Kiseleva L.V.* Ekologiya railway transport. Tutorial. M.: MIIT, 1999. 165 p. (in Russian).
6. *Makarov A.O., Yakovlev A.S.* Assessment of soil contamination in the territory of railway facilities in Moscow. Agrochemical Bulletin. 2013. No 2. P. 29–32 (in Russian).
7. *Mayer R.M., Poulikakos L.D., Lees A.R., Heutsch K., Kalivoda M.T., Soltic P.* Reducing the environmental impact of road and rail vehicles. Environmental Impact Assessment Review. 2012. No 32. P. 25–32.
8. *Pavlova E.I.* Ecology of transport. Textbook for high schools. M.: Higher education. school, 2006. 344 p. (in Russian).
9. *Pronin A.P.* The influence of railway transport on the surrounding environment. Automation on transport. 2016. T. 2, No 4. P. 610–623 (in Russian).
10. *Purgina A., Korolkova A.* Railway transport and the environment. Herald of the Juridical Institute of MIIT. 2014. No. 3 (7). P. 75–87 (in Russian).
11. *Plakhotnik V.N., Onyshchenko Ju.V., Yaryshkina L.A.* The environmental impacts of railway transportation in the Ukraine. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2005. V. 10, No 3. P. 263–268.
12. *Stojic N., Puracevic M., Stojic G.* Railway transportation as a source of soil pollution. Transportation Research Part D. 2017. No 75. P. 124–129.
13. *Voogt J.A., Oke T.R.* Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment. 2003. No 86. P. 370–384.

Баклагин В.Н.¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА БЕЛОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ NSIDC

АННОТАЦИЯ

Ледовые явления, возникающие на акваториях озер и морей, являются чувствительным индикатором регионального и глобального изменения климата, поэтому важно иметь представления о характере протекания ледового режима на озерах и морях, которые ежегодно частично или полностью покрываются льдом. В настоящее время только спутниковые данные могут дать информацию, которая необходима для пространственно-временного анализа ледовых характеристик водоемов. В работе представлены результаты анализа спутниковых данных о пространственном распределении льда Белого моря, представленных Национальным центром США по снегу и льду NSIDC. Сформирован временной ряд значений ледовитости Белого моря за период 2004–2017 гг. с шагом 1 день, на основании которого рассчитаны сроки и длительности ежегодно повторяющегося периода ледовых явлений на Белом море. Установлено, что акватория Белого моря ежегодно практически полностью покрывается льдом (92–97 % площади акватории) в зимнее время, а в летнее время полностью очищается ото льда. Показано, что ряд длительностей ежегодного периода ледовых явлений имеет незначительную изменчивость (коэффициент вариации составляет 10 %), в то время как показатель RCI в большей степени показателен (показатель вариации 21 %) для оценки влияния изменения климатических факторов на изменчивость ежегодного ледового режима Белого моря. Вместе с тем анализ спутниковых данных выявил погрешности в определении пространственного распределения льда в 2004–2005 гг., когда по данным NSIDC в летнее время были зафиксированы ледовые образования незначительных площадей (0,001–0,01 общей площади акватории). Данную погрешность необходимо учитывать при определении сроков и длительностей фаз ледового режима Белого моря.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: данные NSIDC, ледовый режим, ледовитость, Белое море.

Vyacheslav N. Baklagin²

STUDY OF THE ICE REGIME OF THE WHITE SEA BY SATELLITE DATA OF NSIDC

ABSTRACT

Ice phenomena occurring in the water areas of lakes and seas are a sensitive indicator of regional and global climate change, so it is important to have an idea of the nature of the ice regime on lakes and seas, which are partially or completely covered with ice every year. At present, only satellite data can provide the information that is necessary for a spatio-temporal analysis of the ice characteristics of water bodies. The paper presents results of the analysis of

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», пр. А. Невского, д. 50, 185035, Петрозаводск, Россия, e-mail: slava.baklagin@mail.ru

² Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, A. Nevskogo str., 50, 185035, Petrozavodsk, Russia, e-mail: slava.baklagin@mail.ru

satellite data on the spatial distribution of ice in the White Sea, presented by the National Snow and Ice Data Center (NSIDC). The time series of values of the ice coverage of the White Sea for the period 2004–2017 is formed with a step of 1 day, on the basis of which the timing and duration of the annual recurring period of ice phenomena on the White Sea are calculated. It is established that the water area of the White Sea is covered almost every year with ice (92–97 % of the water area) in winter, and in the summer it is completely cleared of ice. It is shown that a number of durations of the annual period of ice phenomena have insignificant variability (the coefficient of variation is 10 %), while the RIC indicator is more indicative (variation index 21 %) for estimating the influence of climatic factors on the variability of the annual ice regime of the White Sea. At the same time, the analysis of satellite data revealed errors in determining the spatial distribution of ice in 2004–2005, when according to NSIDC data ice formations of small areas (0.001–0.01 of the total area of the water area) were recorded in the summer. This error must be taken into account when determining the timing and duration of the phases of the ice regime in the White Sea.

KEYWORDS: data of NSIDC, ice regime, ice coverage, White sea.

ВВЕДЕНИЕ

Лед является индикатором изменения глобального и регионального климата, поэтому исследование ледового режима различных водоемов, в том числе морей, является важной экологической задачей [Clark et al., 1999; Johannessen et al., 2004; Karetnikov et al., 2008; Baklagin, 2017]. Исследование протекания ледового режима водоемов возможно путем анализа временного ряда значений его ледовитости (части акватории водоема, покрытого льдом). В связи с этим очень важно иметь информацию о ледовых явлениях на всей акватории водоема, а не только с отдельного поста наблюдения, расположенного на берегу. Ледовая ситуация на водоеме во время замерзания и вскрытия может меняться очень быстро (например, изменения ледовитости Белого моря могут составлять 0,1–0,3/день). Поэтому для анализа протекания ледового режима водоемов необходимо иметь данные на каждый день.

Современные методы получения информации о состоянии ледяного покрова водоемов предполагает использование спутниковых данных [Latifovic, Pouliot 2007]. Датчики спутников (MODIS, VIIRS, AIRS, MISR и многие другие) ежедневно выполняют многозональную съемку местности в различных диапазонах электромагнитной волны (видимом, инфракрасном, микроволновом) в течение нескольких последних лет (10–25 лет).

С высокой точностью можно рассчитать ледовитость озер визуально-экспертной оценкой, исходя из спутниковых снимков датчика MODIS, выполненных в видимом диапазоне (синтезированные RGB-изображения), обладающих высоким пространственным разрешением [до 250 м в открытом доступе: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data>].

Однако в большинстве случаев выполнить расчет ледовитости озер по спутниковым снимкам видимого диапазона невозможно из-за наличия облачности.

Однако существуют многосенсорные СВЧ-радиометры, которые могут выполнять многозональную съемку в микроволновом диапазоне (ASMU-A, ATMS, AVHRR, MODIS, VIIRS и другие), что позволяет ежедневно фиксировать сцену вне зависимости от облачности. Результатом автоматического картирования многозональных снимков этих систем являются данные о снежном и ледяном покрове планеты. Несмотря на сравнительно невысокое пространственное разрешение (4–6 км), данные применимы для расчета ледовитости крупных озер (Онежское, Ладожское озера и многие другие) и морей (например, Белого моря).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Спутниковые данные, используемые в данном исследовании, представлены Национальным центром США по снегу и льду NSIDC [<ftp://sidacs.colorado.edu/DATASETS/NOAA/G02156/>]. Этот набор данных обеспечивает карты снежного покрова и ледяного покрова для Северного полушария с февраля 1997 г. по настоящее время в интерактивной мультисенсорной системе отображения снежного и ледового центра (IMS) Национального ледового центра. Он получен из множества продуктов данных, включая спутниковые снимки (спутников AQUA, DMSP, DMSP 5D-3/F17, GOES-10, GOES-11, GOES-13, GOES-9, METEOSAT, MSG, MTSAT-1R, MTSAT-2, NOAA-14, NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18, NOAA-N, RADARSAT-2, SUOMI-NPP, TERRA) и данные на месте. Данные представлены в форматах ASCII и GeoTIFF в трех разных разрешениях: 1, 4 и 24 км.

В настоящем исследовании для построения временного ряда значений ледовитости Белого моря применялись данные NSIDC о пространственном распределении льда за период 2004–2017 гг. с пространственным разрешением 4 км и временным шагом 1 день.

Расчет ледовитости Белого моря осуществлялся для каждого момента времени, на который имелись спутниковые данные, путем расчета сумм площадей всех однородных участков (льда и воды), соответствующих географическим координатам акватории Белого моря. Для более точного соответствия идентификация акватории Белого моря по географическим координатам производилась по сетке с пространственным разрешением 1 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты ледовитости Белого моря за период 2004–2017 гг. (рис. 1) по спутниковым данным NSIDC показали, что акватория Белого моря ежегодно почти полностью покрывается льдом (ледовитость почти достигает 1,0) и также ежегодно полностью очищается ото льда (ледовитость достигает 0,0). Однако в отличие, например, от крупных озер (таких как Онежское и Ладожское озера [Efremova et al., 2013]), находящихся на приблизительно равных широтах, ледовитость Белого моря никогда не достигает 1,0. Этот факт свидетельствует о том, что акватория Белого моря может полностью покрываться льдом, но при этом остаются некоторые участки, не покрытые льдом, – разломы и трещины (площадью 2–5 % от площади всей акватории). Такие трещины и разломы могут возникать вследствие отливных и приливных течений, а также в результате сильных ветровых явлений над акваторией Белого моря.

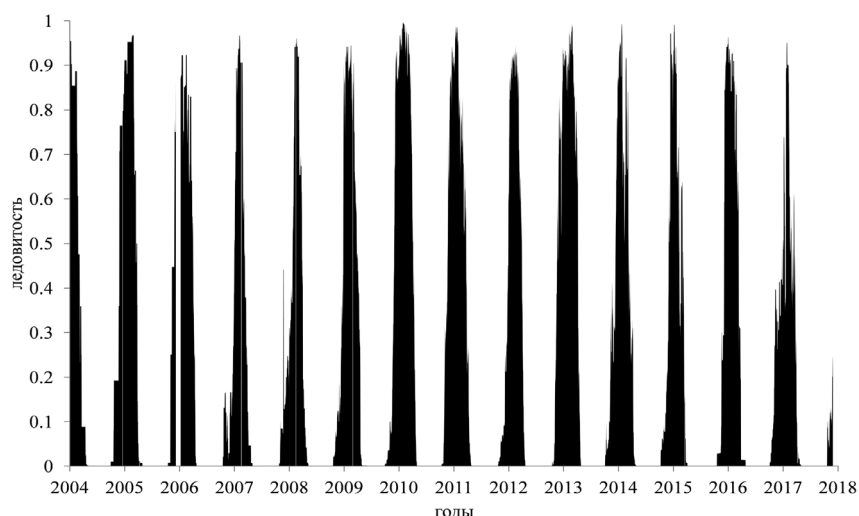


Рис. 1. Изменение ледовитости Белого моря за период 2004–2017 гг.
Fig. 1. Changes of ice coverage of the White Sea for the period 2004–2017

Анализ временного ряда значений ледовитости Белого моря (рис. 2) показал, что длительность ледовых явлений на акватории Белого моря в среднем составляет 202 дня, при этом коэффициент вариации равен 10 %. Это свидетельствует о том, что совокупность значений длительности ледовых явлений на Белом море является однородной. Этот факт может объясняться тем, что длительность протекания ледового режима Белого моря в не-большой степени зависит от изменения климата. Однако данное предположение требует исследования изменчивости ледового режима от климатических факторов (например, среднегодовой температуры воздуха на станциях).

Максимальная длительность ледовых явлений наблюдалась в 2008–2009 гг., когда ледовые явления на Белом море имели место 234 дня, в то время как самым коротким периодом ледовых явлений была зима в 2005–2006 гг., длительность составила лишь 163 дня. Среднестатистическая дата начала ледовых явлений на Белом море за период 2004–2017 гг. по спутниковым данным NSIDC соответствует 11 ноября. При этом самая ранняя дата начала ледовых явлений на Белом море соответствует 18.10.2013, а самая поздняя из данного периода – 10.12.2015. Среднестатистическая дата конца ледовых явлений на Белом море за период 2004–2017 гг. по спутниковым данным NSIDC соответствует 2 июня. При этом самая ранняя дата окончания ледовых явлений на Белом море соответствует 06.05.2015, в то время как самая поздняя – 07.07.2009.

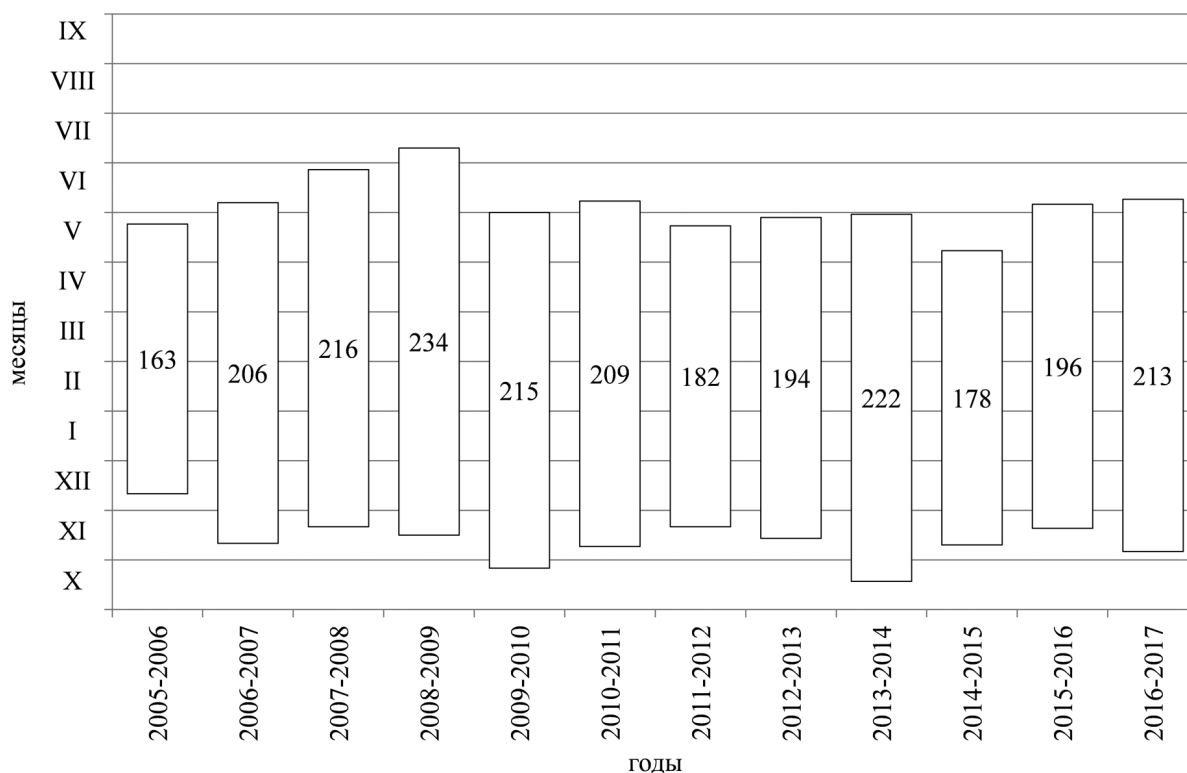


Рис. 2. Сроки и длительности ледовых явлений на Белом море за период 2004–2017 гг.

Fig. 2. Timing and duration of ice phenomena in the White Sea for the period 2004–2017

Также для Белого моря рассчитан показатель RICI за период 2004–2017 гг., используемый для оценки ледового периода Ладожского озера [Karetnikov et al., 2008]. На основании расчетов RICI было выявлено, что наиболее суровая зима наблюдалась в 2012–2013 гг. (RICI составляет 1,37), на рис. 1 этот факт иллюстрирует столбец с наибольшей

площадью, соответствующий 2012–2013 гг. Также достаточно морозные зимы наблюдались в 2005–2006 гг. (1,18), 2009–2010 г. (1,24), 2010–2011 г. (1,16). Наиболее теплая зима за период 2004–2017 гг. наблюдалась в 2007–2008 гг. (0,73), также теплые зимы наблюдались в 2006–2007 гг. (0,76), в 2016–2017 гг. (0,77). При этом необходимо отметить, что коэффициент вариации полученного ряда RICI для Белого моря за период 2004–2017 гг. составляет 21 %. Таким образом, данный ряд более изменчив, чем ряд значений длительности ледового режима. Этот факт свидетельствует о том, что характеристика RICI более показательна при оценке влияния климатических факторов, чем длительность ледового режима.

Необходимо также отметить то, что установить даты начала и конца ледовых явлений Белого моря в 2004–2005 гг. по спутниковым данным NSIDC не удалось. Значения ледовитости Белого моря за период 2004–2005 гг. по спутниковым данным NSIDC не достигали 0 (даже в летнее время значения ледовитости составляли 0,001–0,01). Это не соответствует действительности, поскольку Белое море в летнее время полностью освобождается ото льда. Данный факт свидетельствует о погрешности в определении пространственного распределения льда Белого моря при функционировании алгоритма автоматического распознавания льда. Поэтому при определении сроков и длительностей фаз ледового режима Белого моря необходимо учитывать данную ошибку.

В целом за период наблюдений 2005–2017 гг. (без учета 2004 г. с ошибочными значениями ледовитости) ледовые явления на Белом море имели место 2422 дня, что соответствует 52,2 % всего временного интервала.

ВЫВОДЫ

На основании спутниковых данных NSIDC установлено, что Белое море ежегодно циклично почти полностью покрывается льдом (ледовитость составляет 92–97 %) и в летнее время полностью освобождается ото льда. Исключением является 2004–2005 гг. – в этот интервал времени имеются погрешности в определении пространственного распределения льда на Белом море по спутниковым данным NSIDC, вследствие чего наблюдается малое количество льда (ледовитость 0,001–0,01) даже в летнее время.

Также по спутниковым данным NSIDC установлено, что в значительной степени наиболее изменчивой (чувствительной) характеристикой протекания ледового режима является показатель RICI (коэффициент вариации составляет 21 %) в сравнении с длительностью периода ледовых явлений (коэффициент вариации составляет 10 %) на Белом море.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках госзадания ФАНО России, тема № 86 «Закономерности изменений экосистем Белого моря при интенсификации освоения Арктической зоны региона и под влиянием изменений климата», № государственной регистрации (0223-2015-0008) 2018–2019–2020 гг.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of the FASO Russia state task, theme No 86, No of state registration (0223-2015-0008) 2018–2019–2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Baklagin V.N.* Selection of Parameters and Architecture of Multilayer Perceptrons for Predicting Ice Coverage of Lakes // *Ekológia (Bratislava)*. 2017. V. 36, issue 3. P. 226–234. DOI: <https://doi.org/10.1515/eko-2017-0019>.

2. *Clark P.U., Alley R.B., Pollard D.* Northern Hemisphere Ice-Sheet Influences on Global Climate Change // *Science*. 1999. V. 286, issue 5442. P. 1104–1111. DOI: 10.1126/science.286.5442.1104.
3. *Efremova T., Palshin N., Zdrovennov R.* Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. V. 62, issue 1. P. 33–41. DOI: 10.3176/earth.2013.04.
4. *Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P.* Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability // *Tellus*. 2004. V. 56, issue 4. P. 328–341. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2004.00060.x>.
5. *Karetnikov S.G., Naumenko M.A.* Recent trends in Lake Ladoga ice cover // *Hydrobiology*. 2008. V. 599, issue 1. P. 41–48. DOI: 10.1007/978-1-4020-8379-2_5.
6. *Latifovic R., Pouliot D.* Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record // *Remote Sensing of Environment* 2007. V. 106, issue 4. P. 492–507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.015/>

Дорофеева Д.В.¹, Пищальник В.М.², Минервин И.Г.³,
Пастухова Д.А.⁴, Шумилов И.В.⁵

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕКОВОГО РЯДА ЛЕДОВИТОСТИ ТАТАРСКОГО ПРОЛИВА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

АННОТАЦИЯ

В данной работе реконструирован и сформирован ряд межгодовой изменчивости ледовитости Татарского пролива за период с 1882 по 2017 гг. В основу источника информации для построения ряда легли исторические данные температуры воздуха с прибрежных гидрометеорологических станций (1882–2017 гг.) и наблюдения за ледяным покровом: судовые с 1929 по 1960 гг.; авиационные с 1955 по 1992 гг. и спутниковые с 1971 по 2017 гг. Сглаживание восстановленного ряда выполнено методом Кайзера-Бесселя и выделены долгопериодные колебания ледовитости продолжительностью от 7 до 25 лет. Методом наименьших квадратов были получены тренды динамики межгодовых изменений ледовитости Татарского пролива. Скорость повышения ледовитости в положительных трендах колеблется от 4,5 до 8,9 % за 10 лет, понижения в отрицательных – от 12,3 до 5,8 % за 10 лет. С помощью линейной аппроксимации установлено наличие общей однонаправленной тенденции снижения ледовитости на 6,7 % за последние 135 лет со средней скоростью понижения 0,5 % за каждые 10 лет. По данным о площади ледяного покрова выполнена классификация типов зим по суровости ледовых условий. Период с 1985 по 1994 гг. характеризуется наибольшей повторяемостью мягких зим, а период с 1920 по 1944 гг. отличается самыми суровыми ледовыми условиями в исследуемом вековом ряду. Установлено, что, начиная с 1985 г., в акваториях Татарского пролива и Охотского моря проявляются синхронные колебания в изменении ледовитости.

Результаты настоящего исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (номер для публикаций: 5.9510.2017/8.9).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Татарский пролив, многолетние изменения ледовитости, тенденции, тренды, типизация зим по суровости ледовых условий.

¹ ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», ул. Амурская, 53, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, *e-mail*: x-397-y@mail.ru

² ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», ул. Ленина, 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, *e-mail*: vpishchalnik@rambler.ru

³ ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», ул. Ленина, 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, *e-mail*: igor@minervin.ru

⁴ ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», ул. Ленина, 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, *e-mail*: darya.pastuhova97@gmail.com

⁵ ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», ул. Ленина, 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, *e-mail*: ilyarolevik1@yandex.ru

**Daria V. Dorofeeva¹, Vladimir M. Pishchalnik², Igor G. Minervin³,
Daria A. Pastyhova⁴, Ilya V. Shumilov⁵**

VARIABILITY ANALYSIS OF THE CENTURIAL ICE COVER SERIES OF TATAR STRAIT ON THE BASIS OF SATELLITE AND HYDROMETEOROLOGICAL OBSERVATIONS USING GIS TECHNOLOGIES

ABSTRACT

In this article, series of inter-annual variability of the ice cover of the Tatar Strait were reconstructed and formed for the period from 1882 to 2017. The source of information for constructing the series was based on historical air temperature data from the coastal hydrometeorological stations (1882–2017) and observations of the ice cover: marine from 1929 to 1960; aviation from 1955 to 1992 and satellite from 1971 to 2017. The smoothing of the reconstructed series was performed by the Kaiser-Bessel method and long-period fluctuations of ice cover with duration from 7 to 25 years are marked. Trends of the dynamics of inter-annual changes of the ice cover of the Tatar Strait were obtained by the method of least squares. The rate of increase in ice cover in positive trends ranges from 4.5 to 8.9 % over 10 years, decrease in ice cover in negative trends ranges from 12.3 to 5.8 %. With the help of linear approximation, defined existence of general unidirectional trend of decreasing of ice cover by 6.7 % over the past 135 years with an average rate of decreasing of 0.5 % for every 10 years was established. The classification of winter types by the severity of ice conditions was made according to the ice cover area data. The period from 1985 to 1994 was characterized by the greatest frequency of soft winters, and the period from 1920 to 1944 was distinguished by the most severe ice conditions in the investigated centurial series. It was established that, beginning in 1985, synchronous fluctuations in the variation of ice cover have been occurring in the water areas of the Tatar Strait and the Sea of Okhotsk.

KEYWORDS: Tatar Strait, long-term changes of ice cover, tendency, trends, typification of winters by the severity of ice conditions.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях снижения легкодоступных запасов углеводородов на суше, одной из главных задач восполнения топливно-энергетических ресурсов является освоение недр континентального шельфа. Комплексный анализ геолого-геофизических данных Татарского пролива, изложенный в работах [Нечаюк, Обжиров, 2010; Ломтев, 2011; Жемчугова, 2012], позволил выявить на его акватории перспективные участки залежей углеводородного сырья. Татарский пролив относится к категории замерзающих морей, т. е. имеющих сезонный ледяной покров, который, в свою очередь, накладывает серьезные ограничения на безопасность выполнения морских операций. В этой связи изучение ледового режима исследуемой акватории приобретает особую актуальность. Целью настоящего исследования является восстановление векового ряда колебаний ледовитости Татарского пролива на основе спутниковых и гидрометеорологических наблюдений и его анализ на пространственно-временные изменчивости. В работах, посвященных исследованиям

¹ RN-SakhalinNIPImorneft, ul. Amyrskaya 53, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, e-mail: x-397-y@mail.ru

² Sakhalin State University, ul. Lenina 290, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, e-mail: vpishchalnik@rambler.ru

³ Sakhalin State University, ul. Lenina 290, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, e-mail: igor@minervin.ru

⁴ Sakhalin State University, ul. Lenina 290, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, e-mail: darya.pastuhova97@gmail.com

⁵ Sakhalin State University, ul. Lenina 290, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, e-mail: ilyarolevik1@yandex.ru

ледового режима Японского моря (в том числе и Татарского пролива), данный вопрос не освещался [Якунин и др., 1998; Плотников, 2002; Лобанов и др., 2014; Еременко и др., 2017; Думанская, 2017а, б].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основными источниками данных для восстановления ряда ледовитости Татарского пролива послужили результаты наблюдений за приземной температурой воздуха на прибрежных ГМС (с 1882 по 2017 гг.), эпизодические судовые (с 1929 по 1960 гг. [Крындина, 1964]), регулярные авиационные наблюдения (с 1957 по 1992 гг. [Якунин и др., 1998; Плотников, 2002]), а также спутниковые съемки ледяного покрова, выполняющиеся с 1971 г. по настоящее время с космических аппаратов [<http://www.data.jma.go.jp>]. Каждый способ получения информации имеет свои достоинства и недостатки, различия по временным и пространственным масштабам точности определения границ. По оценкам А.Н. Крындиной (1964), величина ошибки вычисления площади ледяного покрова по данным судовых наблюдений не превышала 10 % от площади исследуемого района, ошибка расчетов по данным авиационных наблюдений не превышает 5 % [Якунин и др., 1998], спутниковых – 2 % [Митник и др., 2015; Пищальник и др., 2017].

Вышеперечисленные временные интервалы наблюдений векового ряда имели пропуски, которые восстановлены методом экспертной оценки и критического контроля данных с последующим приведением их к единой дискретности. С этой целью была применена методика, апробированная для акватории Охотского моря, основанная на корреляционной взаимосвязи динамики ледообразования с количеством накопленной за сезон суммы градусодней мороза (СГДМ), которая рассчитывалась по данным среднесуточных температур воздуха на прибрежных гидрометеорологических станциях (ГМС) [Пищальник и др., 2016]. Наибольшие по абсолютной величине значения коэффициентов корреляции между площадью ледяного покрова Татарского пролива и СГДМ на станциях, получены для ГМС Поронайск и мыс Золотой (0,62 и 0,65 соответственно) (табл. 1).

Временной отрезок ряда ледовитости за период с 1882 по 1928 гг. был восстановлен на основе регрессионной зависимости между рядами ледовитости Татарского пролива и количеством накопленного за сезон холода (СГДМ) по данным ГМС.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции площади ледяного покрова Татарского пролива с СГДМ на прибрежных ГМС
Table 1. Correlation coefficients between the area of the ice cover of Tatar Strait and the sums of degrees of frost at the coastal HMS

Вакканай (В)	Александровск-Сахалинский (АС)	Ильинское (И)	Мыс Золотой (МЗ)	Николаевск-на-Амуре (НА)	Сов. Гавань (СГ)
0,46	0,47	0,47	0,65	0,4	0,45
Терней (Т)	Холмск (Х)	Поронайск (П)	НА + АС + СГ	МЗ + И + Х + В + Т	
0,52	0,46	0,62	0,52	0,54	

Вычисление площади ледяного покрова в период с 1971 по 2017 гг. производилось при помощи программного комплекса «ЛЁД» на основе цветокодированных карт-схем ледяного покрова Японского метеорологического агентства [JMA <http://www.data.jma.go.jp>], составляемых на каждую пентаду (один раз в пять дней) по данным спутниковых наблюдений [Пищальник и др., 2016].

Вычисление среднемесячной ледовитости осуществлялось путем усреднения ее значений за 10-е, 15-е и 20-е числа, а межгодовой – среднемесячных значений с декабря по апрель. Ледовитость определялась как отношение площади, занятой льдом, к площади пролива (107,5 тыс. км²) в процентах.

Таким образом, на основе всех имеющихся доступных гидрометеорологических и расчетных данных был сформирован вековой ряд ледовитости Татарского пролива с 1882 по 2017 гг. (рис. 1).

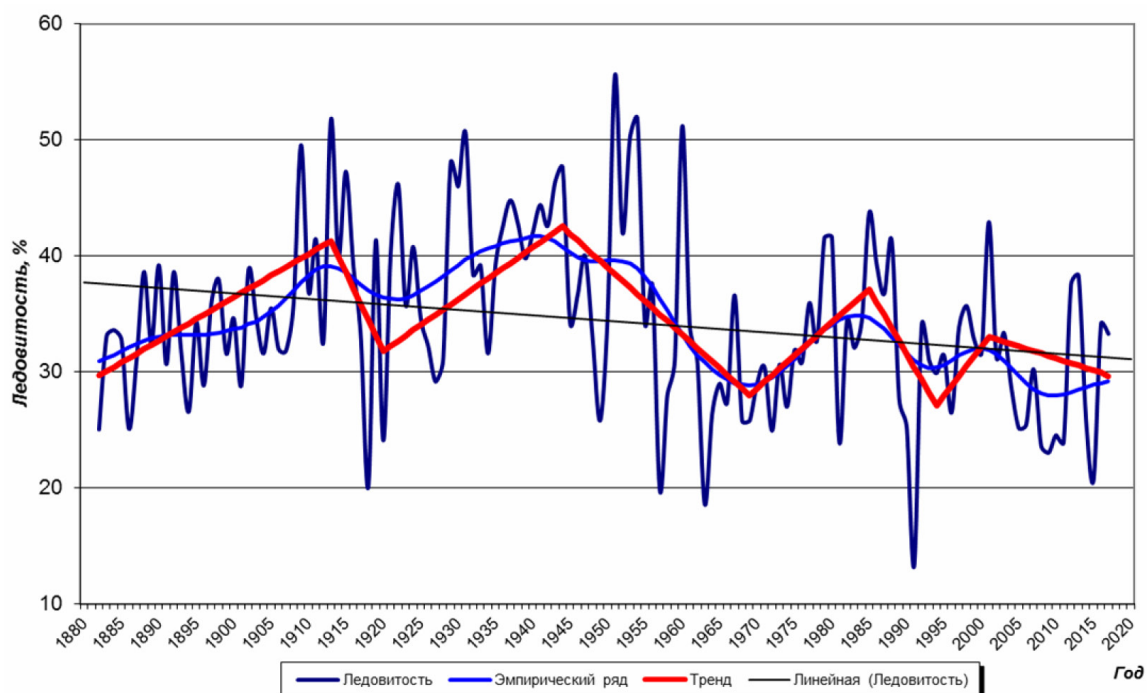


Рис. 1. Вековой ряд ледовитости Татарского пролива с 1882 по 2017 гг. с его аппроксимациями

Fig. 1. The century series of ice cover of the Tatar Strait from 1882 to 2017 and it's approximations

В процессе анализа пространственно-временных характеристик данного векового ряда и определения трендов повышения и понижения ледовитости было исключено действие случайных факторов. Для этого на основе исходного ряда ледовитости, используя метод Кайзера-Бесселя, в основе которого лежит аппроксимация «окном Кайзера» вида (1) [Рабинер, Гоулд, 1978]:

$$\omega_k(t) = (S(\beta\sqrt{1 - [2t / (T - 1)]^2}) / (S(\beta))), \quad -((T - 1) / 2) \leq t \leq (T - 1) / 2 \quad (1),$$

где S – площадь ледяного покрова в процентах, T – исследуемые годы (нечетное число), ω_k – частотная характеристика квазипериодического дискретного ряда, был построен эмпирический сглаженный ряд. Расчеты производились с помощью интерактивного программного комплекса Mario, разработанного в Сахалинском Государственном университете и находящегося в открытом доступе [www.shipdesign.ru] [Поплавский и др., 1997]. Среднеквадратичные отклонения сглаженного ряда от исходного приведены в (табл. 2).

Суммарный коэффициент вариаций составляет 0,65 %, что свидетельствует о малой степени разброса значений сглаженного ряда относительно исходного ряда ледовитости.

Таблица 2. Отклонения сглаженного ряда от исходного ряда ледовитости
Table 2. Deviations of the smoothed series from the original ice cover series

Год	Среднее значение векового ряда	Среднее значение сглаженного ряда	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %
1882–1894	32,2	32,4	0,06	0,19
1894–1922	36,3	36,1	0,04	0,11
1922–1969	37,2	37,4	0,02	0,05
1969–1993	32,2	32,3	0,00	0
1993–2010	30,0	30,3	0,09	0,3
			$\Sigma = 0,21$	$\Sigma = 0,65$

Выявленные основные периоды колебаний сглаженного ряда исследовались на экстремумы. Применяя метод наименьших квадратов, аппроксимируем основные полупериоды кусочно-линейными трендами, определив диапазоны значений ледовитости и соответствующих лет, решив систему (2):

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n t_i S_i \\ a \sum_{i=1}^n t_i + b n = \sum_{i=1}^n S_i \end{cases}, \quad (2)$$

где S_i – значение ледовитости, t_i – значение соответствующих лет, n – число исследуемых точек полупериода.

Так как значения ледовитости в точке экстремума кусочно-линейных трендов слева и справа, как правило, различны, общий тренд построен по их средним значениям (рис. 1). Найдем отклонения (табл. 3).

Таблица 3. Отклонение тренда от сглаженного ряда
Table 3. Deviation of the trend from the smoothed series

Год	Среднее значение сглаженного ряда	Среднее значение тренда	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %
1882–1913	34,3	35,5	0,220	0,64
1913–1920	37,6	35,9	0,646	1,72
1920–1944	39,5	37,5	0,413	1,05
1944–1969	35,3	35,0	0,059	0,17
1969–1985	32,4	32,9	0,124	0,38
1985–1994	31,9	31,6	0,122	0,38
1994–2001	31,5	30,5	0,393	1,25
2001–2017	29,0	31,3	0,558	1,92
			$\Sigma = 2,537$	$\Sigma = 7,51$

Общий тренд динамики изменения ледовитости исходного ряда был аппроксимирован линейной функцией с применением ПО Microsoft Office Excel (см. рис. 1).

Классификация типов зим по суровости ледовых условий осуществлялась по значениям ледовитости на основе количественного критерия $0,8 \sigma$. Согласно работе В.А. Спичкина (1987), значение $1,2 \sigma$ служит границей крупной положительной или отрицательной аномалии. При принятом диапазоне $0,8 \sigma$, было выделено пять типов зим: ЭС –

экстремально суровая ($\geq 1,2 \sigma$), С – суровая (от $> 0,4 \sigma$ до $< 1,2 \sigma$), У – умеренная (от $> -0,4 \sigma$ до $< 0,4 \sigma$), М – мягкая (от $> -1,2 \sigma$ до $< -0,4 \sigma$) и ЭМ – экстремально мягкая ($\leq -1,2 \sigma$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В восстановленном ряду межгодовых колебаний ледовитости Татарского пролива за период с 1882 по 2017 гг. выделены многолетние периоды с положительной (с 1920 по 1944, с 1969 по 1985, с 1994 по 2001 гг.) и отрицательной (с 1913 по 1920, с 1944 по 1969, с 1985 по 1994 гг.) динамикой изменения ледовитости, продолжительность которых варьирует от 7 до 25 лет (см. рис. 1). Среднее значение ледовитости за весь период исследований уменьшилось на 6,7 %.

Средняя ледовитость пролива для всего исследуемого периода составляет 34,4 %. Скорость повышения ледовитости колебалась от 4,5 до 8,9 % за 10 лет, понижения – от 12,3 до 5,8 % за 10 лет. В течение всего периода исследований понижение ледовитости происходило со средней скоростью 0,5 % за 10 лет. Максимальное значение ледовитости наблюдалось в 1951 г. (55,6 %), минимальное – в 1991 г. (13,3 %). Следует отметить, что начиная с 1985 г., тренды изменения ледовитости Татарского пролива и Охотского моря практически совпадают [Пищальник, 2017].

Важной характеристикой ледового режима является типизация зим по суровости ледовых условий. Результаты расчетов типизации представлены в табл. 4 за весь исследуемый период типы зим по суровости ледовых условий распределились следующим образом: ЭС – 12 %, С – 21 %, У – 34 %, М – 23 % и ЭМ – 10 % (рис. 2).

Таблица 4. Типизация зим по суровости ледовых условий
в Татарском проливе с 1882 по 2017 гг.
Table 4. Typification of winters by severity of ice conditions
in the Tatar Strait from 1882 to 2017

Тип зимы	Годы
Экстремально суровый	1909, 1913, 1915, 1922, 1929, 1930, 1931, 1937, 1941, 1943, 1944, 1951, 1953, 1954, 1960, 1985
Суровый	1988, 1890, 1892, 1898, 1902, 1911, 1914, 1916, 1919, 1921, 1924, 1932, 1933, 1935, 1936, 1938, 1939, 1940, 1942, 1947, 1952, 1979, 1980, 1986, 1988, 2001, 2012, 2013
Умеренный	1883, 1884, 1885, 1889, 1893, 1895, 1897, 1899, 1900, 1903, 1904, 1905, 1906, 1907, 1908, 1910, 1912, 1917, 1923, 1925, 1926, 1934, 1945, 1946, 1948, 1950, 1955, 1956, 1961, 1967, 1975, 1977, 1978, 1982, 1983, 1984, 1987, 1992, 1995, 1997, 1998, 1999, 2000, 2003, 2016, 2017
Мягкий	1887, 1891, 1894, 1896, 1901, 1927, 1928, 1949, 1958, 1959, 1962, 1964, 1965, 1966, 1968, 1969, 1970, 1971, 1973, 1974, 1976, 1989, 1990, 1993, 1994, 1996, 2002, 2004, 2006, 2007, 2014
Экстремально мягкий	1882, 1886, 1918, 1920, 1957, 1963, 1972, 1981, 1991, 2005, 2008, 2009, 2010, 2011, 2015

Максимальная повторяемость ЭС зим отмечалась в периоды: 1913–1920, 1920–1944 и 1944–1969 гг. – 25, 32 и 19 %, соответственно. Максимальная повторяемость М зим наблюдалась в периоды 1944–1969, 1969–1985 и 1985–1994 гг. – 35, 35 и 40 %, соответственно. Максимальная повторяемость М и ЭМ зим наблюдалась в период с 1985 по 1994 гг. (50 %), а С и ЭС – в период с 1920 по 1944 гг. (72 %).

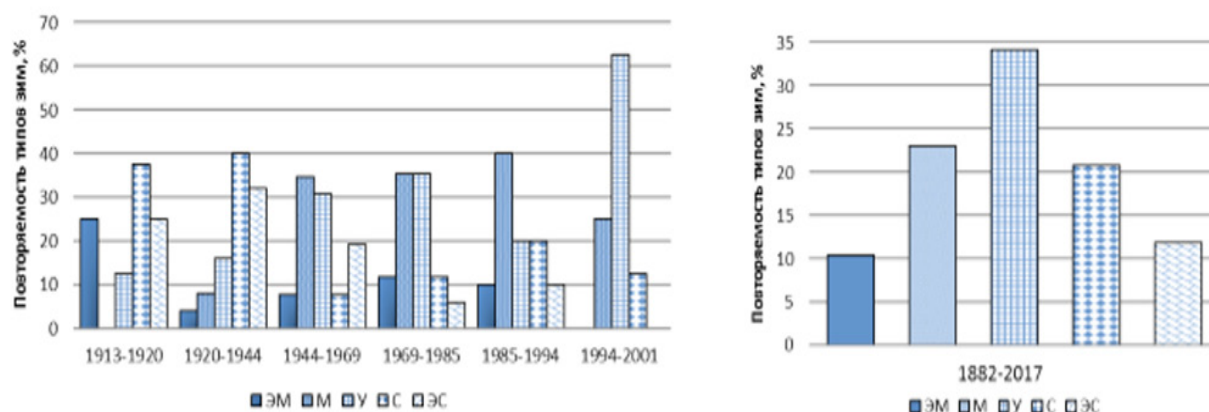


Рис. 2. Повторяемость типов зим по суровости ледовых условий в Татарском проливе для различных временных периодов
 Fig. 2. Repeatability of winter types by severity of ice conditions in the Tatar Strait for different time periods

Следует заметить, что в отличие от Охотского моря, в котором ЭМ зимы начали проявляться только в период потепления (с 1991 г.), в Татарском проливе они систематически наблюдались в течение всего векового периода [Пищальник и др., 2016]. Вместе с тем характер долгопериодных колебаний в период потепления, который по общей однонаправленной тенденции понижения ледовитости отмечается в Охотском море с 1980 г., а в Татарском проливе с 1985 г. является идентичным.

ВЫВОДЫ

1. Впервые представлен и описан вековой ряд ледовитости Татарского пролива с 1882 по 2017 гг., сформированный на основе данных, полученных с помощью различных методов наблюдений.
2. Среднее значение ледовитости Татарского пролива за весь период исследования составляет 34,4 %. Выявлен общий тренд уменьшения ледовитости на 6,7 % (средняя скорость понижения 0,5 % за 10 лет).
3. Абсолютный максимум ледовитости наблюдался в 1951 г. (55,6 %), минимум – в 1991 г. (13,3 %).
4. Максимальная повторяемость С и ЭС зим (72 %) отмечалась в период с 1920–1944 гг., а М и ЭМ зим (50 %) – в период с 1985–1994 гг.
5. Начиная с 1985 г. тренды изменения ледовитости Татарского пролива и Охотского моря практически сонаправлены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Думанская И.О. Особенности типизаций ледовых условий в Японском море (Татарский пролив и залив Петра Великого) по суровости зим и по ледовитости районов моря // Труды Гидрометцентра России. 2017а. С. 170–192.
2. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России / Японское море. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017б. 640 с. ISBN 978-5-9908623-6-4.
3. Еременко И.В., Дорофеева Д.В., Романюк В.А., Пищальник В.М. Исследование изменений ледовитости Татарского пролива на основе данных дистанционного зондирования Земли // ИнтерКарто/ИнтерГИС 23: Материалы Междунар. конф. М.: Изд-во Моск. университета, 2017. Т. 3. С. 20–31. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-20-31.

4. Жемчугова Т.А. Перспективы нефтегазоносности осадочного чехла центральной части Татарского пролива по результатам бассейнового моделирования // Научно-технический вестник ПАО «НК «Роснефть». 2012. Вып. 28. С. 16–19.
5. Крындин А.Н. Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положения кромки льда на дальневосточных морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции // Тр. ГОИН. 1964. Вып. 71. С. 5–80.
6. Лобанов В.Б., Данченков М.А., Лучин В.А. и др. Дальневосточные моря России // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 684–743.
7. Ломтев В.Л. К строению и газонасности западного борта Северо-Татарского трога (Японское море) // Современное состояние наук о Земле. Материалы Междунар. конф. памяти В.Е. Хаина. М.: Изд-во Геологического фак-та МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. С. 1162–1165.
8. Митник Л.М., Трусенкова О.О., Лобанов В.Б. Дистанционное радиофизическое зондирование океана и атмосферы из космоса: достижения и перспективы (обзор) // Вестник ДВО РАН. 2015. № 6. С. 21–22.
9. Нечаюк А.Е., Обжиров А.И. Структуры и нефтегазоносность бассейнов Татарского пролива // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле, 2010. Вып. 16. № 2. С. 27–34.
10. Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 гг. // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 228–239.
11. Пищальник В.М., Минервин И.Г., Романюк В.А. Анализ изменений ледового режима в отдельных районах Охотского моря в период потепления // Вестник РАН. 2017. Т. 87, № 5. С. 429–440. DOI: 10.7868/S0869587317050024.
12. Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. Владивосток: Дальнаука, 2002. 171 с.
13. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов М.: Мир, 1978. 834 с.
14. Спичкин В.А. Определение критерия крупной аномалии // Тр. ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 15–20.
15. Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Непон К.И., Королев Ю.П. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. Владивосток: ДВО РАН, 1997. 272 с.
16. Якунин Л.П., Плотников В.В., Петров А.Г. Ледовые условия // Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VIII. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. С. 347–394.

REFERENCES

1. Dumanskaya I.O. Distinctive properties of the typing of the situations in the Sea of Japan (in the Strait of Tartary and Peter the Great Bay) on the basis of severity of winters and on the basis of the ice cover of these regions. Trudy gidromet center RF. 2017a. P. 170–192 (in Russian).
2. Dumanskaya I.O. Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. M.; Obninsk: IG-SOTsIN, 2017b. 640 p. ISBN 978-5-9908623-6-4 (in Russian).
3. Eremenko I.V., Dorofeyeva D.V., Romanyuk V.A., Pishchalnik V.M. Investigation of changes in the ice extent of the Tatar Strait on the basis of data from remote observation zones. InterKarto, InterGIS 23. Materialy Mezhdunar. konf. M. Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 2017. P. 20–31 (in Russian).
4. Krindin A.N. Seasonal and interannual changes in ice extent and ice edge in the Far Eastern seas due to the peculiarities of atmospheric circulation. Tr. GOIN. 1964. P. 5–81 (in Russian).

5. *Lobanov V.B., Danchenkov M.A., Luchin V.A. et al.* Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. M.: Rosgidromet, 2014. P. 684–743 (in Russian).
6. *Lomtev V.L.* The structure and gas content of the western side of the North Tatar Trough (the Sea of Japan). *Sovremennoye sostoyaniye nauk o Zemle. Mat-ly mezhd. Konf. pamyati V.E. Khaina.* M.: Izd-vo Geologicheskogo fak-ta MGU im. M.V. Lomanosova, 2011. P. 1162–1165 (in Russian).
7. *Mitnik L.M., Trusenкова O.O., Lobanov V.B.* Remote radiophysical sounding of the ocean and the atmosphere from space: achievements and prospects (review). *Vestnik DVO RAN.* 2015. No 6. P. 21–22 (in Russian).
8. *Nechayuk A.E., Obzhairov A.I.* Structures and oil and gas content of the basins of the Tatar Strait. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle.* 2010. V. 16, No 2. P. 27–34 (in Russian).
9. *Pischalnik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batuhtina A.S.,* Analysis of the dynamics of anomalies in the ice cover of the Sea of Okhotsk during the period from 1882 to 2015. *Izv. TINRO,* 2016. V. 185. P. 228–239 (in Russian).
10. *Pischalnik V.M., Minervin I.G., Romanyuk V.A.,* Analysis of ice regime changes in separate areas of the Sea of Okhotsk during warming. *Vestnik RAN.* 2017. T. 87, No 5. P. 429–440. DOI: 10.7868/S0869587317050024 (in Russian).
11. *Plotnikov V.V.* Variability of ice conditions in the Far Eastern seas of Russia and their forecast. Vladivostok: Dalnauka, 2002. 172 p. (in Russian).
12. *Poplavskiy A.A., Khramushin V.N., Nepon K.I., Korolev Yu.P.* Operative forecast of tsunami on the sea coasts of the Russian Far East. DVO RAN, 1997. 272 p.
13. *Rabiner L., Gould B.* Theory and method of signal processing. M.: Mir, 1978. 834 p. (in Russian).
14. *Spichkin V.A.* Determination of the criterion of a large anomaly. *Tr. AANII.* 1987. V. 402. P. 15–20 (in Russian).
15. *Yakunin L.P., Plotnikov V.V., Petrov V.A.* Ice conditions. Proekt "Morya". *Gidrologiya i gidrohimiya morei. T. VIII. Yaponskoye more. Vip. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya.* SPb.: Gidrometeoizdat, 1998. P. 347–394 (in Russian).
16. *Zhemchugova T.A.* Prospects of oil and gas content of the sedimentary cover of the central part of the Tatar Strait according to the results of basin modeling. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik PAO "NK "Rosneft".* 2012. V. 28. P. 16–19 (in Russian).

Кравцова В.И.¹, Другов М.Д.²

ИЗМЕНЕНИЯ ДЮННОГО РЕЛЬЕФА АНАПСКОЙ ПЕРЕСЫПИ ПО МАТЕРИАЛАМ ПОВТОРНОГО ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Анапская пересыпь из-за сильного антропогенного воздействия испытывает деградацию. Для разработки мер ее охраны нужна информация о текущих изменениях ее рельефа. Такие данные получены методом воздушного лазерного сканирования с разрешением по высоте 1 см, выполненного в 2013 и 2015 гг. Рассчитана разностная цифровая модель рельефа (ЦМР), выявившая изменения высоты поверхности за 2 года. Сопоставление разностной ЦМР с картами ландшафтно-морфологической структуры пересыпи, составленными ранее по космическим снимкам сверхвысокого разрешения и цифровым аэроснимкам, позволило выявить изменения рельефа, разные по виду и генезису. На всем протяжении пересыпи выделен 41 участок, различающийся по характеру изменений рельефа. Они сгруппированы в 7 районов с преобладанием разных типов изменений. Все изменения разделены на природные, характерные для естественных ветровых и волновых процессов, природно-антропогенные (в которых природные деструктивные процессы возбуждены или усилены антропогенным вмешательством) и антропогенные изменения. Природные процессы преобладают лишь на 30 % протяжения пересыпи, среди них: ветровая аккумуляция песка на пляжных дюнах; выдувание песка с наветренных склонов дюнных валов и аккумуляция его за гребнями; волновой размыв обращенных к морю склонов дюнных валов на узком пляже. В районах антропогенного воздействия при нарушении растительного покрова процессы выдувания на наветренных склонах дюнных валов резко усиливаются. По поперечным проездам к пляжу образуются коридоры выдувания-заплеска волн с эоловыми и гидрогенными конусами выноса, размыв по которым зафиксирован разностной ЦМР. Наиболее сильны антропогенные изменения: срытие дюн, засыпание озера для подготовки к строительству; разрушение защитных валов и возведение новых.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пересыпь, изменения рельефа, лазерное сканирование, антропогенное воздействие.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: valentinamsu@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: midrug@gmail.com

Valentina I. Kravtsova¹, Mikhail D. Drugov²

CHANGES OF ANAPA BAY BAR DUNE RELIEF BASED ON REPEATED AIRBORNE LASER SCANNING

ABSTRACT

Anapa bay bar degrades due to strong anthropogenic impact [Krylenko, 2012]. Information about current morphological changes is necessary for developing of measures for its conservation. This data were obtained from air laser scanning survey, carried out in 2013 and 2015 with 1 cm height resolution. Calculated difference digital elevation model (DDEM) has revealed changes of bay bar relief for 2 years. Comparison of DDEM with maps of bay bar landscape-morphological structure, compiled at preceding years by high resolution satellite images and digital air photos, allowed to investigate various by type and genesis morphological changes. 41 spots with different character of morphological changes, were allocated. They were grouped into 7 regions with prevailing of specific type of changes. All changes were divided to: natural, with natural wind and waves processes; natural-anthropogenic (where natural destructive processes are intensified by human impact) and anthropogenic changes. Natural processes prevail only at 30 % of bay bar. The main of them are: aeolian accumulation of sand at beach dunes; sand blowing out at windward slopes of dune ridges and accumulation behind the ridge; wave abrasion of dune seaward slope at narrow beach. In regions with anthropogenic impact and destruction of vegetation cover, processes of sand blowing out at windward slopes are intensified. Along transverse roads to beach blowouts with aeolian and hydrogen cones are forming; erosion along them was detected by DDEM. Anthropogenic changes are the strongest: dunes are digging out; lakes are filling up during preparation for construction; destroying of defense ridges and creation of new ones for optimization of their position.

KEYWORDS: bay bar, relief changes, laser scanning, anthropogenic impact.

ВВЕДЕНИЕ

Анапская пересыпь – крупная аккумулятивная форма берегового рельефа на северо-восточном побережье Черного моря – представляет собой ценный рекреационно-бальнеологический ресурс. Сочетание песчаных пляжей, дюнного рельефа, климатических и грязелечебных условий привлекает сюда все больше отдыхающих, однако использование территории пока никак не регулируется. Резко усилившееся антропогенное воздействие вызывает деградацию ландшафтов пересыпи, ставя под вопрос само ее в дальнейшем как уникальной природной системы [Крыленко, 2012]. Для разработки мер защиты и охраны пересыпи необходим мониторинг ее современного состояния и изменений. Южное отделение института океанологии (ЮО ИО) РАН совместно с географическим факультетом МГУ осуществляют такой мониторинг. Материалы аэрокосмической съемки используются для детального картографирования современного состояния рельефа и ландшафтов пересыпи, выполненного в 2012–2017 гг., а для исследования изменений рельефа в 2013 и 2015 гг. проведено воздушное лазерное сканирование (ВЛС) с интервалом 2 года. Цель этой статьи – выявить, как меняется

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* valentinamsu@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* midrug@gmail.com

рельеф пересыпи от года к году, установить, каковы основные природные динамические процессы рельефообразования и выяснить, как они преобразуются в условиях антропогенного воздействия. Изучению эоловых процессов на аккумулятивных морских берегах посвящен ряд работ, основанных на натурных наблюдениях и экспериментах [Егоров, 1957; Зенкович, 1958; Айбулатов, 1966; Выхованец, 2003], в наших же исследованиях эти процессы впервые изучаются на основе дистанционных методов с применением ВЛС.

Район исследований – Анапская пересыпь – простирается на 47 км от южной оконечности Таманского полуострова – м. Железный рог – на севере до м. Анапский на юге (рис.). Литодинамическая система пересыпи состоит из абразионного участка с прислоненным пляжем (коренной берег Таманского полуострова), участков аккумулятивных террас (Веселовская терраса, Благовещенский останец, Анапская терраса) и пересыпей, отделяющих от Черного моря лиманы (лагуны) – оз. Соленое, лиманы Бугазский (с Кизилташским), Витязевский, оз. Чембурское, Анапские плавни.



Район исследований – Анапская пересыпь
Research Area – Anapa bay bar

В поперечном строении собственно пересыпи как аккумулятивной формы прослеживаются три основные зоны: пляж, зона дюн, зона бугристых песков. За ними следует либо берег лимана, либо отмерший клиф [Косьян, Крыленко, 2014]. Район пересыпи в рекреационном отношении освоен неравномерно. Хотя первые лечебницы в Анапе появились уже в конце XIX в., масштабное освоение территории произошло в послевоенные годы. К настоящему времени сомкнулась застройка рекреационной зоны Анапы и поселков Джемете и Витязево, заняв прилиманное понижение Анапских плавней и бугристые пески под уступом Анапской террасы. В центральной части пересыпи,

у Благовещенского останца, базы отдыха ст. Благовещенской заняли участок пересыпи, примыкающий к прилиманному понижению западного края Витязевского лимана. В западной части района, вблизи пос. Веселовка, на пересыпь надвигается новая рекреационная зона. Участки пересыпи, близлежащие к застроенным, осваиваются любителями экстремальных видов спорта. Рекреационно не освоенными пока остаются лишь участки в средней части Бугазской пересыпи и Витязевская пересыпь.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование базируется на материалах двух типов: детальных картах ландшафтно-морфологической структуры пересыпи и данных об изменении высоты поверхности за 2 года по результатам повторного ВЛС.

Ландшафтно-морфологическая структура пересыпи изучены по снимкам со спутника WorldView-2 2011 г. (с разрешением 2 м) и цифровым аэрофотоснимкам 2013 г. (с разрешением 10 см) и закартографированы на основе их полевого дешифрирования. В предшествующие годы в лаборатории аэрокосмических методов географического факультета МГУ составлены крупномасштабные (1 : 5000, а в журнальном варианте 1 : 10 000) карты ландшафтно-морфологической структуры различных участков пересыпи, теперь покрывшие ее практически на всем протяжении [Кравцова, Фалалеева, 2015]. Карты отражают текущее состояние рельефа пересыпи как результат длительного действия рельефообразующих процессов.

Для выявления результатов протекания этих процессов на небольшом интервале времени и с количественной оценкой краткосрочных изменений рельефа использовались материалы воздушного лазерного сканирования, выполненного одновременно с аэросъемкой с легкого самолета аппаратурой ALS-70-CM производства Leica Geosystems в 2013 и 2015 гг. [Boyko et al., 2015]. По материалам лазерного сканирования созданы ЦМР и разностная ЦМР [Кравцова и др., 2017], по которым исследовались изменения дюнного рельефа за 2 года.

Сопряженный анализ карты ландшафтно-морфологической структуры и разностной ЦМР, проведенный последовательно, от участка к участку, на всем протяжении пересыпи позволяет установить, каким элементам ландшафтно-морфологической структуры свойственны изменения высоты поверхности за относительно небольшой (двухлетний) интервал времени, каков характер этих изменений и их интенсивность, с чем связаны эти изменения, в какой мере определяются естественными природными процессами и как трансформируются при антропогенном воздействии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Материалы последовательного сопоставления карт ландшафтно-морфологической структуры и разностной ЦМР на всем протяжении пересыпи представлены в табл. Выделены участки, в пределах которых характер рельефа и его изменений сохраняется. 41 участок отмечен на рис. 1, где отражено также преобладание изменений, разных по генезису – природных, природно-антропогенных или антропогенных. Участки сгруппированы по 7 географически различающимся районам пересыпи (в зависимости от того, какие лиманы она отчленяет или к каким клифам примыкает, а также от изменения направления береговой линии, определяющего ветровую экспозицию берега, и от характера рекреационного использования территории). В таблице кроме номера участка приведены также номера опорных профилей, используемых ЮО ИО РАН в исследованиях пересыпи, и указана протяженность участков.

Изменения дюнного рельефа Анапской пересыпи за 2013–2015 гг.
Changes of Anapa bay bar dune relief for 2013–2015

№	Профиль	Длина, км	Особенности участка и изменения рельефа на нем
I. Пересыпь озера Соленого и Горького, западный край Бугазской пересыпи			
1	45	0,2	Участок на южном берегу Таманского п-ова, выше начала аккумулятивного тела пересыпи с дюнными валами. Под уступом коренных пород образовался песчаный вал волновой аккумуляции. По разностной ЦМР отмечается увеличение высоты вала. Вал формируется из песка пляжа за счет волнового заплеска и последующего перевевания просохшего песка. На крутых участках уступа разностная ЦМР отмечает значительное понижение поверхности за счет оползней, обвалов, а также мощный вал накопления материала под ними
2	45 44	1,3	Пересыпь оз. Соленого. Участок, на котором сформировавшийся в прошлом дюнный вал был разрушен, затем на его месте для проведения массовых мероприятий был создан искусственный вал, но в исследуемый период 2013–2015 гг. последовало его разрушение. Изменения рельефа вызваны растаптыванием остатков естественного и искусственного вала, их волновое разрушение с образованием галечникового волноприбойного «вала» высотой 0,5 м (кромки волнового заплеска гальки). На участках разреженной растительности в тылу разрушенных валов происходит эоловое накопление песка, наблюдается начальная стадия образования навесных пляжных дюн
3	43 42	1,0	Участок выхода к морю застройки пос. Веселовка и дальнейшего распространения строительства в прилиманье понижения. Зона неорганизованной рекреации с свободным подходом к морю. Дюнный пояс уничтожен и заменен искусственными валами. Для разных частей участка характерны: а) размыв пляжа перед валами из ракушечника; б) размыв пляжа и остатков естественного дюнного вала, с перехлестыванием волн через него и отложением материала (морского мусора) за бывшим валом; в) размыв ранее созданного защитного вала и создание нового, на новом месте, либо создание нового вала за счет срытия старого – в целях оптимизации положения защитных валов. В прилиманном понижении изменения рельефа связаны со строительством – произведено засыпание прилиманного озера и других понижений рельефа, и, напротив, образование карьеров на прилегающих склонах для изъятия грунта для засыпания озер и болот
4	42 41	1,2	Участок пересыпи оз. Горького, перемишки между ним и Бугазским лиманом и пересыпи в крайней западной части Бугазского лимана. Это участок интенсивной рекреации (народного грязелечения в оз. Горьком; сезонного лагеря любителей кайтинга и виндсерфинга на Бугазском лимане). Береговой дюнный вал здесь почти уничтожен, и пересыпь представлена бугристыми песками, расчлененными густой сетью проходов к морю. Изменения рельефа включают уничтожение остаточных участков берегового дюнного вала, а в прилиманном понижении между Бугазским лиманом и оз. Горьким – срытие повышенных участков с зарослями растительности для выравнивания территории под строительство и для организации транспортных стоянок. В поясе бугристых песков идет перевевание, с отложением материала на закрепленных растительностью участках

Продолжение табл.

№	Профиль	Длина, км	Особенности участка и изменения рельефа на нем
II. Средняя часть Бугазской пересыпи (до кефалевого хозяйства)			
5	41	0,5	Переходный участок между зоной значительного антропогенного воздействия и «природной» территорией в западной части Бугазской пересыпи. Это район кратковременного проживания рекреантов с размещением палаток на пляже. В связи с уменьшением антропогенной нагрузки сохранились отдельные фрагменты дюнного вала. В отличие от предыдущего участка, где дюнный пояс рассечен густой сетью проходов, здесь более редкая сеть проездов к морю, но со значительными участками их расширения при приближении к пляжу, вокруг которых образуются крупнобугристые пески. Разностная ЦМР фиксирует значительные площади навевания песка на буграх с кочками полыни по бортам этих расширенных съездов
6	41	0,3	Участок появления дюнного вала, пока еще не сомкнутого. Расчленяющие его редкие проезды к морю завершаются при выходе на дорогу вдоль лимана конусами выноса песка с бугристым эоловым рельефом. На этих конусах разностная ЦМР отмечает пятнистое развевание песка. На остальных участках рельеф за 2 года стабилен
7	41 40	1,3	Начало единого берегового дюнного вала большой протяженности, расчлененного редкой сетью поперечных проездов. Неширокий (30–40 м) пляж способствует подмыванию дюнного вала волнением и образованию асимметричного профиля вала – крутого мористого наветренного склона и более пологого подветренного. Во второй половине участка за береговым дюнным валом появляются срединные валы. В пределах этого участка происходит не только волновая обработка мористого склона, но и полный волновой размыв части дюнного вала с образованием на месте вала с пологими склонами асимметричного вала с крутым мористым и пологим обратным склоном
8	39	0,8	Протяженный участок почти непрерывного берегового дюнного вала в районе наиболее полного развития дюнного пояса со срединными валами, межваловыми котловинами и бугристыми песками. Традиционная для дюнного вала картина развевания наветренного склона и отложения песка за гребнем в виде ветровых шлейфов, образующих сплошную вдольгребневую зону аккумуляции. В конце участка – небольшие пятна развевания песка по поперечным коридорам
9	39 38	0,2	На этом небольшом участке берегового дюнного вала и бугристых песков динамика берегового дюнного рельефа не выражена
10	38	0,7	Аналогично участку 8 – сплошной береговой дюнный вал, сопровождаемый с тыла бугристыми песками и срединными дюнными валами с межваловыми котловинами. Типичная для дюнного вала картина небольшого развевания песка на наветренном склоне, переноса его за гребень и отложения на подветренном в виде шлейфов ветровой аккумуляции сохраняется. На прилиманном понижении этого и соседних участков отмечается пятнистое увеличение высоты, связанное с разным состоянием тростниковой растительности в моменты съемок
11	37	0,2	Участок по характеру рельефа в целом аналогичен участкам 8 и 10, но отличается более узким пляжем. Происходит размыв мористого наветренного склона берегового дюнного вала с образованием шлейфов аккумуляции на подветренном склоне

Продолжение табл.

№	Профиль	Длина, км	Особенности участка и изменения рельефа на нем
12	37 36	1,2	Участок, по характеру рельефа аналогичный участкам 8, 10, с протяженным сплошным береговым дюнным валом, внутренними валами, межваловыми котловинами и бугристыми песками. Характерно развитие шлейфов эоловой аккумуляции песка за гребнем дюнного вала без признаков развевания или размыва наветренного мористого склона
13	36	0,3	Продолжение сплошного берегового дюнного вала с крутым мористым наветренным и пологим подветренным склонами. Перед современным валом на пляже сохраняются остатки ныне размытого более широкого вала в виде островных бугров и кочек полыни. За береговым валом в дюнном поясе следует серия внутренних валов, направленных под углом 45° к береговому, поднимающихся над прилиманым понижением. Развитие бугристых песков не характерно
14	35	0,5	Участок очень низкого, местами исчезающего берегового дюнного вала, за которым сформированы короткие, направленные под углом 45° к берегу внутренние валы с межваловыми котловинами между ними и бугристыми песками. Зона аккумуляции песка не следует четко за гребнем берегового вала, а имеет пятнистый характер и связана с внутренними валами. На оголенных наветренных склонах отдельных внутренних дюн есть четкие пятна развевания песка, видимо, из-за антропогенного уничтожения растительности
15	35 34	0,4	Участок исчезающего берегового вала, где вместо него появляется уступ от бугристых песков к пляжу, рассеченный поперечными ложбинами. В устьевых частях выходящих к пляжу ложбин – пятна резкого размыва; размыв характерен и для мористых склонов сохранившихся участков берегового вала. В бугристых песках вокруг поперечных ложбин пятна аккумуляции неопределенной формы, которые приходятся на наветренные склоны внутренних валов
16	34	1,0	На участке перед кефалевым хозяйством пляж расширяется и размыва дюнного вала здесь нет. На выпуклых участках наветренных склонов дюн и в бугристых песках наблюдаются пятна аккумуляции песка
III. Восточная часть Бугазской пересыпи (от кефалевого хозяйства до комплекса «Кассандра»)			
17	33	1,0	В районе кефалевого хозяйства естественный дюнный рельеф пересыпи практически не сохранился. Основные элементы здесь – водообменный канал между морем и Бугазским лиманом шириной 15–20 м с пропускным шлюзом, окаймленный с обеих сторон защитными валами. К ним прилегают широкие (50 м) песчаные полосы со следами подгребания песка к валам. Кроме главного канала имеются два дополнительных справа и слева от него, также обвалованных. В районе каналов береговая линия выдвинута в лиман до 400 м, образуя полуостров; накопление материала на нем обусловлено особенностью течений в лимане. Участок юго-восточной части главного канала расчищен, выровнен и занят застройкой сотрудников хозяйства. Зафиксированные ЦМР изменения рельефа в этом районе связаны с разрушением защитных валов и их возобновлением

Продолжение табл.

№	Профиль	Длина, км	Особенности участка и изменения рельефа на нем
18	32	0,7	Участок мощного размыва берега и прорыва морских вод к лиману. Произошел размыв пляжа и широких ложбин на наветренном склоне дюнного вала, выходявших к пляжу, а на участке протяженностью 300 м, на расстоянии 300–600 м южнее прямоугольной защитной стенки, полностью размыв береговые дюнные валы со слабым отложением материала за ними. По одной из поперечных ложбин произошел прорыв морских вод за линию дороги, идущей вдоль лимана, размыв вдоль дорожного защитного вала и участка прилиманного понижения. С южной стороны от дороги возведен новый защитный вал
19	31	1,6	Узкий (70–100 м) участок Бугазской пересыпи между кефалевым хозяйством и расширением пересыпи перед Благовещенским останцом. На всем этом, как и на предыдущем участке, разбросаны временные домики кайтеров, и он схож с участком рекреации экстремальных спортсменов у северо-западного окончания Бугазского лимана. На этом участке нет единого четкого берегового дюнного вала, вместо этого – разрозненные фрагменты дюн, разделенные ровными песчаными пространствами между ними, представляющими собой расширенные коридоры выдувания-заплеска, образовавшиеся по линиям проезда транспорта. Характерны пятна размыва песка по коридорам, особенно перед подножиями отдельных дюнных бугров. Одновременно наблюдается навевание и отложение песка на наветренных склонах бугров и частично на подветренных. Наблюдается также аккумуляция песка на придорожных валах севернее дороги и возобновление вдоль дорожных валов, играющих роль защитных
20	30	1,1	Расширенная часть Бугазской пересыпи перед Благовещенским останцом. Единого дюнного фронтального берегового вала на этом участке нет, он фрагментирован многочисленными и разно направленными ложбинами – коридорами выдувания-заплеска, между которыми сохранились расширенные участки дюн разной ориентировки, не имеющих четко выраженных гребней. Идет навевание песка с пляжа на мористые склоны дюн, в западной части района значительное и повсеместное, а в восточной менее сильное. Оно сопровождается развеванием участков коридоров выдувания-заплеска, особенно в местах их пересечения, более сильным в восточной части района, где сеть поперечных проездов гуще и разветвленней
21	29	0,6	Участок с полностью уничтоженным дюнным рельефом, выравниванием территории и застройкой рекреационного комплекса «Кассандра». На остатках дюнного рельефа между двумя блоками застройки наблюдается навевание песка на наветренных склонах дюнных бугров и развевание или размыв вдоль проездов – коридоров выдувания-заплеска. В пределах застроенных территорий произошли изменения антропогенного характера – вырыто углубление для постройки бассейна, выполнено подсыпание грунта на площадках между зданиями. На берегу Бугазского лимана под крутым абразионным уступом Благовещенского останца полоса увеличения высоты поверхности приходится на берег лимана с тростниковой и кустарниковой растительностью и может быть связана с изменением ее состояния в разные даты съемки (как и на других участках прилиманного понижения Бугазского лимана)

Продолжение табл.

№	Профиль	Длина, км	Особенности участка и изменения рельефа на нем
IV. Пересыпь, примыкающая к клифу Благовещенского останца и кутовой части Витязевского лимана с рекреационной застройкой станицы Благовещенской			
22	29 28	1,4	Участок Благовещенского останца без фронтального берегового дюнного вала, но с надувными дюнами на поверхности останца, на высоте 20 м. Рельеф этих дюн стабилен, наблюдается небольшое развевание наветренных склонов. Под уступом останца на пляжных дюнах и на оголенных участках причлененных дюн идет небольшое навевание и отложение песка. Слабый шлейф навевания наблюдается также выше бровки уступа. В восточной части уступ пересекают два глубоких эрозионных вреза, в которых, возможно, идет изъятие песка на строительные нужды. В средних частях этих врезов произошло резкое понижение поверхности, а на окружающих врезы дюнных буграх идет навевание и аккумуляция песка. Перед первым врезом образовался вал из перемещенного вниз материала, а перед вторым он размыт. В восточной части участка, у погранзаставы, где пляж сужается, идет размыв (или развевание) крутого уступа и аккумуляция песка выше бровки уступа
23	27 26	1,5	Участок, где уступ Благовещенского останца отступает на восток, освобождая на берегу пространство для развития дюнного рельефа. В слабо развитом дюнном рельефе с нечетко выраженным фронтальным дюнным валом, сильно фрагментированным поперечными проездами, и небольшими отходящими от него под косыми углами внутренними валами и бугристыми песками, расчлененными густой сетью проездов и проходов к пляжу, наблюдается пестрая картина чередования пятен развевания песка на лишенных растительности участках наветренных склонов и полос аккумуляции на участках с растительностью, в основном на подветренных склонах. Слабое развитие и фрагментированность дюнного пояса вызваны тем, что участок активно используется рекреантами-автомобилистами, несмотря на шлагбаум, установленный при въезде на него из ст. Благовещенская. На поверхности Благовещенского останца в пределах этого участка сильные антропогенные изменения связаны со строительством новых сооружений – изъятием грунта для котлована проектировавшегося здесь игрового комплекса и отложением вырытого грунта
24	25 24 23	3,2	Участок пляжа и дюнного пояса, примыкающий к зоне рекреационной застройки станицы Благовещенской, с организованными выходами к пляжу по тропам и перекидным мосткам. Береговой дюнный пояс представлен частично нечетко выраженным плосковершинным дюнным валом, но на большем протяжении вдоль береговым фронтальным дюнным склоном; и тот и другой характеризуются стабильностью. В поясе пляжных дюн, развитом на широком пляже, наблюдается аккумуляция песка. Для зоны застройки характерна антропогенная динамика – вырыты котлованы для бассейнов и, напротив, засыпаны грунтом заболоченные западины в прилиманном понижении кутовой части Витязевского лимана

Продолжение табл.

№	Профиль	Длина, км	Особенности участка и изменения рельефа на нем
V. Витязевская пересыпь между автостоянкой пляжа ст. Благовещенской и западным краем застройки Витязево			
25	23-18	5,0	Протяженный участок Витязевской пересыпи от автостоянки пляжа ст. Благовещенской до 1-го рыбоходного канала между Витязевским лиманом и морем. Это широкая (700–1300 м) пересыпь с обширным прилиманном понижением, невыраженным береговым дюнным валом, замещенным фронтальным дюнным склоном, и хорошо развитыми пляжными дюнами на широком пляже. Участок в целом динамически стабилен. Для пояса пляжных дюн на мористом скате пляжа характерна зона аккумуляции песка. В бугристых песках и прилиманном понижении имеются небольшие участки развевания, четко привязанные к петлям дорог, пересекающих дюны. Есть несколько участков с такими петлями, связанных с ездой на квадроциклах. Небольшие пятна развевания есть и на участках бугристых песков со слабым покрытием растительностью. В восточной части района, где имеется древесная растительность, отмечается понижение поверхности, связанное с различиями состояния растительности в разные сроки съемки. Отмечаемое ЦМР понижение поверхности в русле канала связано с различным уровнем воды в нем в разные моменты съемки
26	18 17 16	2,0	На обширном участке юго-восточнее 1-го водообменного канала в тыловом понижении зоны пляжа, куда может заходить вода из канала, появляется осоково-тростниковая растительность с деревьями ивы и лоха серебристого, вначале в виде узкой полосы шириной 10 м, которая восточнее постепенно расширяется до 20–30 м. В зоне пляжа, как и на предыдущем участке, занятой пляжными дюнами, происходят процессы эоловой аккумуляции песка. К тыловому понижению выше пляжа примыкают бугристые пески, вначале с мягко бугристым рельефом и сильно разреженной растительностью, а затем крупнобугристые, закрепленные полынью с кустами тамарикса и лоха. Ближе к лиману низкие участки прилиманного понижения заняты зарослями тростника. Вся зона выше пляжа в целом стабильна, отмечаются лишь небольшие пятна навевания на буграх в бугристых песках
27	16 15 14	2,0	Участок широкой Витязевской пересыпи с переменным затопляемой тыловой зоной пляжа, окаймленной узким слабо выраженным фронтальным дюнным склоном, и с несколькими естественными каналами перелива морских вод через дюнный склон и зону бугристых песков в прилиманное понижение. В зоне пляжных дюн наблюдается небольшая аккумуляция песка, но на отдельных участках ближних к морю пляжных дюн – также и размывание их мористых склонов. На бортах ложбин перелива морских вод в лиман наблюдается размыв участков дюнного склона и бугристых песков, сопровождаемый также отложением песка выше участков размыва. Зона бугристых песков и прилиманного понижения в целом стабильна

Продолжение табл.

№	Профиль	Длина, км	Особенности участка и изменения рельефа на нем
28	14 13 12 11	2,5	Крайний юго-восточный участок Витязевской пересыпи до западного края застройки Витязево. Участок включает 2-й водообменный канал между морем и Витязевским лиманом, разветвляющийся и имеющий три выхода к морю, у которых оборудованы автостоянки. Рельеф пляжа и дюнного пояса на этом участке, находящемся в 2 км от Витязево, доступном по дорогам, следующим вдоль каналов и подверженном антропогенному воздействию, кардинально меняется. Пояс пляжных дюн расчленяется на островные фрагменты, высота их уменьшается от 1–2 м до нескольких сантиметров и после восточного выхода к морю канала, вблизи застройки Витязево, они исчезают и далее на всем протяжении Анапской пересыпи не появляются. Тыловое понижение пляжа, заливаемое при нагонах, здесь также не формируется, а в тылу пляжа образуется фронтальный дюнный вал с более пологим наветренным склоном, имеющим бугристый рельеф; бугры закреплены кустами полыни и разделены продольными и поперечными ложбинами, образуя сетчатую структуру. Подветренные склоны дюнных валов более крутые и частично закреплены древесно-кустарниковой растительностью (лох, тамарикс). Зона бугристых песков отделяет их от прилиманного понижения. Краткосрочные (за 2 года) изменения рельефа на этом участке связаны с созданием защитных валов вокруг площадок автостоянок, оборудованных при выходах к морю ответвлений канала, а также вокруг площадки лодочной станции. Для бугристой поверхности наветренных склонов фронтальных дюнных валов характерны многочисленные мелкие пятна аккумуляции песка на закрепленных полынью буграх и развевания его по поперечным ложбинам между буграми, используемым для движения мотоциклов и квадроциклов. На гребне дюнного вала с кустами тамарикса и лоха происходит значительное надувание песка, образование надувных песчаных шлейфов и частично небольшое надувание в бугристых песках. В обширном прилиманном понижении образовались небольшие участки развевания по петлеобразным трассам движения квадроциклов. Вблизи застройки Витязево видны несколько карьеров песка, изымаемого на нужды строительства
VI. Северная часть Анапской пересыпи (с застройкой Витязево, Джемете)			
29	11 10	1,2	Участок выхода к пляжам нескольких улиц пос. Витязево (улицы Мира, Черноморская, Светлая), ведущих к центральному пляжу. Заборы баз отдыха и пансионатов подступают непосредственно к дюнному поясу. У выхода к пляжам улиц он рассечен прорезями, а на обращенных к морю склонах дюнного вала густая сеть пешеходных тропинок уничтожила большую часть растительности, обусловив их полосчатую структуру с сетью ложбин поперек склона. Разностная ЦМР отмечает сильное выдувание песка из этих оголенных ложбин на наветренных склонах и его аккумуляцию на гребнях дюн с кустами лоха и на подветренных склонах, а также между ними и заборами и защитными стенками пансионатов. На широком пляже отмечается накопление песка в зоне перед дюнным валом (возможно, что при отсутствии сильного растаптывания здесь происходило бы образование пляжных дюн). В пределах поселка многочисленны антропогенные преобразования рельефа, связанные со строительством новых сооружений

Продолжение табл.

№	Профиль	Длина, км	Особенности участка и изменения рельефа на нем
30	10	0,5	Небольшой участок, в тылу парковой зоны санатория «Жемчужина России», на котором отсутствует сеть прорезей и сохранилась сетчатая структура наветренного склона дюнного вала. Характерна аккумуляция песка на закрепленных полынью буграх при его развевании в отдельных поперечных ложбинах, и значительное накопление на гребне дюнного вала. На широком пляже в его приморской зоне также происходит накопление материала
31	9	1,3	Участок дюнного вала с выходами улиц южной части пос. Витязево и северной части пос. Джемете, где сгущается сеть прорезей, но еще сохраняется сетчатая структура наветренного склона дюнного вала. Характерно значительное развевание, а возможно, и штормовой размыв по прорезям, при навевании песка на буграх наветренного склона и значительная аккумуляция материала на гребне вала с зарослями лоха
32	8 7 6	3,0	Участок выхода к пляжам по улицам пос. Джемете и прорезям, образующим густую сеть. На наветренных склонах дюнного вала остатки бугристого рельефа с куртинами полыни образуют полосчатую структуру, но преобладают участки с полным уничтожением растительного покрова. Характерно очень сильное выдувание песка с наветренных склонов, при углублении рассекающих их ложбин, и значительное накопление материала на залесенном гребне и за ним. Зона накопления очень четко оконтуривает гребни дюнных валов, не только залесенные, но и с отдельными кустами тамарикса
33	5	0,3	Небольшой участок, на котором застройка пос. Джемете отделена защитной стенкой от зоны пляжа с остаточными фрагментами бугристого наветренного склона дюнного вала. Застройка здесь распространилась на место уничтоженного дюнного вала. Эоловые процессы протекают под влиянием защитной стенки: в верхней части зоны пляжа происходит накопление материала, а непосредственно перед стенкой – выдувание песка, углубление поверхности
34	5	0,3	Участок пос. Джемете, где защитная стенка с тыла оконтуривает гребень дюнного вала, поднимающегося над узким (10–20 м) пляжем и испытывающего действие волнения. На участке вала, параллельном берегу, наблюдается сильный размыв мористого склона вала и накопление материала на залесенном подветренном склоне, а при изменении направления вала – размыв и развевание наветренного склона по поперечным ложбинам, с накоплением песка на залесенной вершине вала и подветренном склоне
35	5 4	0,4	Участок «набережной» Джемете, представляющей собой окружающую поселок дорогу (или одностороннюю улицу), огражденную стенкой, с проходами через нее к пляжу. Дюнный пояс уничтожен, на месте дюнного вала осталась группа бугров, закрепленных кустами тамарикса и лоха, разделенных песчаными ложбинами. На наветренных склонах бугров и по ложбинам идет развевание песка, а в тылу бугров, у ограждающей набережную стенки – накопление материала. Интенсивность этих процессов здесь невелика

Продолжение табл.

№	Профиль	Длина, км	Особенности участка и изменения рельефа на нем
36	4	0,3	Участок на краю Джемете с защитными стенками поселка и сохранившимся дюнным валом, окаймляющим обширное понижение и расширение пляжа между Джемете и рекреационной зоной Анапы. Отмечается размыв или развевание песка перед подножием дюнного вала, сменяющийся его отложением перед защитными стенками и даже накоплением больше высоты защитной стенки. На наветренном склоне дюнного вала идет развевание песка по расчленяющим его поперечным ложбинам и накопление на залесенном гребне вала. На этом участке зафиксировано также образование в прошлые годы крупного песчаного шлейфа, перекрывающего защитную стенку и перекидывающегося на территорию поселка. Однако перед более высокими и капитальными защитными стенками происходит сильное выдувание песка с углублением поверхности
VII. Южная часть Анапской пересыпи (с застройкой северной рекреационной зоны Анапы)			
37	4 3	0,9	Участок северного окончания рекреационной зоны Анапы. Район пересыпи без четко выраженного фронтального дюнного вала, со слабо поднимающимися над пляжем широкими и невысокими (6–7 м), параллельными берегу валами, за которыми следуют бугристые пески и новые невысокие валы. Многочисленны обширные площадки расчистки территории дюнного пояса под застройку. Вместе с изменением характера дюнного рельефа здесь меняется и картина распределения процессов развевания песка и его отложения. Для тыловой зоны пляжа, перед поднимающимися над ним валами, характерно развевание песка, а на пологих наветренных склонах с кочками разреженной поlynной растительности – его аккумуляция. Однако она не заходит в следующую за валами зону бугристых песков, слабо закрепленных злаковой растительностью; не наблюдается аккумуляция и на залесенных гребнях валов (в отличие от предыдущих участков пересыпи в Витязево–Джемете, где четко наблюдалось отложение песка на залесенных гребнях). Такие изменения могут быть связаны с постепенным поворотом береговой линии в южном направлении, и соответственно, сменой ветровой экспозиции берега. На участке строительства нового пирса четко выделяется углубление для установки свай пирса через дюнный пояс и отсыпание грунта по обеим сторонам от углубления
38	3 2	0,9	Участок пересыпи, где вместо единого дюнного вала образовались небольшие валы, не всегда параллельные берегу, иногда система из 2–3 параллельных между собой валов небольшой высоты (4–5 м), при общей ширине дюнного пояса около 200 м. В тылу пляжа, перед валами, и особенно в ложбинах на их наветренных склонах, отмечается размыв, а на залесенных подветренных склонах – аккумуляция песка. В случаях нескольких параллельных валов такая смена развевания наветренных склонов и аккумуляции на залесенных подветренных повторяется

№	Профиль	Длина, км	Особенности участка и изменения рельефа на нем
39	1	1,2	Участок сужения дюнного пояса; вместе с бугристыми песками он занимает полосу шириной 100 м, из которых на дюнные валы приходится 30–50 м, а высота их снижается до 3–4 м. На этом участке в тылу дюнных валов образовались продольные понижения рельефа, в которые при штормах захлестывается морская вода, проникающая через дюнный пояс по поперечным ложбинам-прорезям. Однако на разностной ЦМР за два года эти процессы не проявились. Понижения в тылу валов, занятые бугристыми песками, используются для складирования грунта, изъятых после срытия дюнных валов при строительстве. Отмечен участок такого техногенного накопления материала. В целом же на этом участке в ослабленном виде проявляются те же процессы, что и на предыдущем: размыв перед валами и накопление материала на их подветренных склонах
40	1	0,6	Участок очень слабого развития дюнного рельефа (в связи с изменением направления берега, которое становится параллельным преобладающим ветрам). Дюнные валы шириной 15–20 м снижаются до 2–3 м, а вблизи устья р. Анапки сохранились лишь остаточные бугры высотой до 1,5 м; пояс бугристых песков в тылу валов имеет ширину 50–60 м и используется для складирования отвалов грунта при строительстве подходящих непосредственно к нему зон отдыха. На разностной ЦМР четко проявились участки изъятия грунта и его складирования, с большими объемами перемещенного материала. Хорошо видны также участки выравнивания территории для создания спортивных площадок; в связи с необходимостью защиты от затопления эти участки обваловываются
41	0	1,4	Южнее устья р. Анапки дюнный рельеф отсутствует. Вблизи устья есть участки размыва и отложения песка, связанные с изменениями направления стока при выходе реки в море. На широком городском пляже Анапы существенных изменений нет, но в крайней южной части пляжа, вблизи аквапарка, разностная ЦМР зафиксировала участок повышения поверхности пляжа, возможно, обусловленного подсыпанием песка, практикуемым в связи с его дефицитом на пляже

ВЫВОДЫ

В результате сопоставительного анализа ландшафтно-морфологической карты пересыпи и разностной ЦМР выявлено следующее. Природные процессы, не измененные антропогенным влиянием, действуют в двух районах – один находится в западной части Бугазской пересыпи, при удалении от Веселовки более 3 км, распространяясь до кефалевого хозяйства, и второй – на Витязевской пересыпи между пляжем станицы Благовещенской и Витязево, на удалении 3 км от него. Наблюдаются два основных типа этих процессов. Аккумуляция песка на пляжных дюнах, формирующихся при отсутствии фронтального дюнного вала, характерна для Витязевской пересыпи. Второй тип наблюдается на Бугазской пересыпи с фронтальным дюнным валом, для которого характерно выдувание песка или размывание волнами наветренного (мористого) склона дюнного вала и аккумуляция песка на его гребне и подветренном склоне в виде эоловых шлейфов. Штормовой размыв может приводить к полному исчезновению участков дюнного вала.

На участках, подверженных антропогенному воздействию, при повреждении растительности наветренных склонов эти процессы обостряются, что особенно ярко проявляется на Анапской пересыпи в районе поселков Витязево и Джемете. Выдувание песка по ложбинам на наветренных склонах углубляет эти ложбины, но сопровождается его аккумуляцией на залесенных гребнях и за ними. Из-за пересечения дюнного пояса прорезающими для прохода к пляжу (в юго-восточной части пересыпи – в Витязево, Джемете, Анапе) и поперечными дорогами для проезда к нему (в северо-западной части пересыпи) появляются новые очаги дефляции – образуются коридоры выдувания-заплеска волн с формированием у их окончания эоловых конусов выноса песка или гидрогенных конусов при переливе морских вод в лиман, сопровождаемом затоплением и размыванием прилиманного понижения. На участках антропогенного разрушения защитного дюнного вала за ним возбуждаются эоловые процессы – начальное формирование пляжных дюн, что характерно для пересыпи оз. Соленого, отложение песка в поясе бугристых песков.

Объемы перемещения песка, которые при действии природно-антропогенных процессов увеличиваются по сравнению с природными, еще более резко возрастают на участках антропогенных преобразований. Наибольшие изменения рельефа наблюдаются при засыпании озер и болот в связи с подготовкой территории под застройку, что произошло в районе Веселовки, а также при изъятии и складировании грунта в бугристых песках в районе Анапы. Не столь внушительно по объемам, но наиболее опасно по последствиям уничтожение защитных валов – существовавших ранее естественных дюнных валов или созданных на их месте искусственных валов, наиболее ярко проявившееся на пересыпи оз. Соленого и в Веселовке.

Выявленные закономерности развития динамических процессов формирования рельефа пересыпи при разных видах антропогенного воздействия дают основу для разработки мероприятий по охране и защите Анапской пересыпи как исключительно ценного рекреационного ресурса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудника Кубанского государственного университета Е.Е. Бойко за организацию съемки пересыпи.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors thank E.E. Boyko for carry out airborne laser scanning of Anapa bay bar.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А. Исследование вдоль берегового перемещения песчаных наносов в море. М.: Наука, 1966. 149 с.
2. Выхованец Г.В. Эоловый процесс на морском берегу. Одесса: Астропринт, 2003. 268 с.
3. Егоров Е.Н. Роль эоловых процессов в динамике отмелого аккумулятивного берега // Тр. ин-та океанологии АН СССР. 1953. Т. VII. С. 126–134.
4. Зенкович В.П. Морфология и динамика советских берегов Черного моря. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 1. 187 с.
5. Косьян Р.Д., Крыленко В.В. Современное состояние морских аккумулятивных берегов Краснодарского края и их использование. М.: Научный мир, 2014. 256 с.
6. Кравцова В.И., Фалалеева А.А. Картографирование ландшафтно-морфологической структуры Анапской пересыпи по спутниковым снимкам высокого разрешения // Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. Интеркарто-ИнтерГИС-21. Краснодар: КУБГУ, 2015. С. 33–47. DOI: <http://dx.doi.org/10.24057/2414-9179-2015-1-21>.

7. *Кравцова В.И., Крыленко В.В., Другов М.Д., Бойко Е.С.* Исследование динамики рельефа северо-западной части Анапской пересыпи по материалам воздушного лазерного сканирования // Геоинформатика. 2017. № 4. С. 48–62.
8. *Крыленко В.В.* Природные и антропогенные факторы, определяющие эволюцию Анапской пересыпи. Автореф. канд. дисс. Южное отделение Ин-та океанологии РАН. Геленджик, 2012. 24 с.
9. *Boyko E., Krylenko V., Krylenko M.* LIDAR and airphoto technology in the study of Black sea accumulative coasts // Abstracts 3rd Intern. Conf. on Remote Sensing and Geoinformation of Environment-RSCy. 2015. P. 61.

REFERENCES

1. *Aibulatov N.A.* Study of longshore sand sediments transport at sea M.: Nauka, 1966. 149 p. (in Russian).
2. *Boyko E., Krylenko V., Krylenko M.* LIDAR and airphoto technology in the study of Black sea accumulative coasts. Abstracts 3rd Intern. Conf. on Remote Sensing and Geoinformation of Environment-RSCy. 2015. P. 61.
3. *Egorov E.N.* Role of aeolian processes in dynamics of accumulative flat coast. Trudy Instituta okeanologii AS USSR. 1957. V. 21 (in Russian).
4. *Kos'jan R.D., Krylenko V.V.* The current state of the accumulative coasts of Krasnodar region and their management. M.: Nauchnyj mir, 2014. 256 p. (in Russian).
5. *Kravtsova V.I., Falaleeva A.A.* Mapping of landscape-morphological structure of Anapa bay bar by high resolution satellite images. Ustojchivoe razvitie territorij: kartografo-geo-informacionoe obespechenie. InterCarto-InterGIS-21. Krasnodar: KUBGU, 2015. P. 33–47. DOI: <http://dx.doi.org/10.24057/2414-9179-2015-1-21> (in Russian).
6. *Kravtsova V.I., Krylenko V.V., Drugov M.D., Boyko E.S.* Investigation of relief dynamics of the Northern-Western part of Anapa bay bar by materials of air laser scanning. Geoинформатика. 2017. No 4. P. 48–62 (in Russian).
7. *Krylenko V.* Natural and anthropogenic factors which determine evolution of Anapa bay bar. Synopsis of PhD thesis. The Southern Branch of the Shirshov Institute of Oceanology RAS. Gelendjik, 2012. 24 p. (in Russian).
8. *Vykhovanets G.V.* Aeolian process at sea coast Odessa: Astroprint, 2003. 268 p. (in Russian).
9. *Zenkovich V.P.* Morphology and dynamics of the Soviet Coast of the Black Sea. M.: AS USSR, 1958. V. 1. 187 p. (in Russian).

Калиничева С.В.¹

**ВЫЯВЛЕНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ МЕРЗЛЫХ И ТАЛЫХ ПОРОД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ
КРИОЛИТОЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ ОЛЕКМО-ЧАРСКОГО НАГОРЬЯ
В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ)**

АННОТАЦИЯ

В статье приведена апробация методики выявления многолетнемерзлых пород и таликов с использованием спутниковых данных, а также показаны возможности картографирования их распространения в зоне прерывистой мерзлоты в горных районах Южной Якутии, на примере Олекмо-Чарского нагорья. Исследование проводилось в центральной части Тарыннахского железорудного месторождения (Мурун-Тарыннахского поднятия). Приведены результаты корреляционного анализа спутниковых данных с полевыми натурными материалами. Детально охарактеризованы индикационные свойства радиационной температуры (теплового инфракрасного излучения поверхности ландшафта), получаемого с помощью инфракрасной съемки Landsat-5/TM в канале 6 для выявления и регионального картографирования многолетнемерзлых пород. Выражено влияние физико-географических факторов (ландшафтных криоиндикаторов), влияющих на формирование температуры подстилающих пород и тем самым на их состояние (мерзлое и талое), которое отражается в интенсивности радиационной температуры. Криоиндикаторы дополняют друг друга и в условиях резкорасчлененного горного рельефа достаточно четко позволяют выявлять массивы мерзлых и талых пород. Использован метод неконтролируемой классификации для дифференциации типов растительного и снежного покровов с мультиспектральных снимков в программе ArcGis10.1.

По результатам исследований с использованием методики выявления мерзлых и талых пород с применением спутниковых снимков, разработанной ранее автором на примере Эльконского горного массива, определены закономерности формирования температуры подстилающих пород в подошве годовых колебаний по основным физико-географическим факторам, а также получена новая пространственная картина (карта) дифференциации мерзлых и талых пород в рассматриваемом районе исследования. Повторная апробация разработанной методики подтвердила возможность ее использования для исследования многолетнемерзлых пород в горных районах криолитозоны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ландшафтная индикация, многолетнемерзлые породы, картографирование, дистанционное зондирование, тепловая инфракрасная съемка.

¹ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, д. 36, 677010, Якутск, Россия, e-mail: ikoveta@rambler.ru

Svetlana V. Kalinicheva¹

IDENTIFICATION AND MAPPING OF PERMAFROST AND TALIKS USING SATELLITE IMAGES (ON THE EXAMPLE OF THE OLEKMO-CHARSKIY HIGHLAND IN SOUTHERN YAKUTIA)

ABSTRACT

Approbation of the technique for the identification of permafrost and taliks using satellite data is shown in the article, as well as the possibilities of mapping their distribution in the zone of discontinuous permafrost in the mountainous regions of South Yakutia, as exemplified by the Olekma-Charskiy Highland. The study was carried out in the central part of the Tarynnakh iron ore deposit (Murun-Tarynnakh Uplift). The results of the correlation analysis of satellite data with field full-scale materials are presented. The indicator properties of the radiation temperature (thermal infrared radiation from the surface of the landscape) obtained using the Landsat-5/TM infrared survey in channel 6 for the identification and regional mapping of permafrost are described in detail. The influence of physical and geographical factors (landscape cryoindicators) affecting the formation of the temperature of the underlying rocks and thereby their state (frozen and thawed), which is reflected in the intensity of the radiation temperature, is expressed. Cryoindicators supplement each other and, under the conditions of sharply dissected mountain relief, sufficiently clearly reveal the masses of permafrost and thawed rocks. The method of uncontrolled classification for differentiating vegetation and snow cover types from multispectral snapshots was used in the ArcGis10.1 program.

Based on the results of studies using the method for detecting permafrost and thawed rocks using satellite imagery, developed earlier by the author on the example of the Elkon mountain massif, the patterns of formation of the temperature of the underlying rocks in the base of annual fluctuations by the main physical and geographical factors were determined, and a new spatial picture) differentiation of permafrost and thawed rocks in the study area under consideration. The repeated approbation of the developed technique confirmed the possibility of its use for the study of permafrost in the mountainous regions of the cryolithozone.

KEYWORDS: landscape indication, permafrost, mapping, remote sensing, thermal infrared survey.

ВВЕДЕНИЕ

Южная Якутия – один из наиболее осваиваемых районов страны ввиду концентрации в нем различных природных ресурсов и их экономической значимости. Интенсивное хозяйственное освоение территории делает необходимым разработку действенных мер по охране природной среды, рациональному использованию, определение мерзлотно-инженерной оценки территории, принципов и методов строительства в условиях сложной мерзлотной обстановки. В частности, промышленное освоение крупных месторождений, расположенных на юго-западе Республики Саха (Якутия), одним из которых является Мурун-Тарыннахское поднятие, с крупнейшим по разведанным запасам – Тарыннахским железорудным месторождением, предполагает в программе развития производительных сил России и РС(Я) до 2020 г., создание инфраструктуры, включающей в том числе строительство дорог, линий электропередач и различных инженерных

¹ Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya str., 36, 677010, Yakutsk, Russia, *e-mail:* ikoveta@rambler.ru

сооружений. Решение перечисленных и многих других вопросов должно основываться на знании мерзлотной обстановки территории. На территориях с расчлененным горным рельефом проведение мониторинговых исследований многолетнемерзлых пород затрудняется сложным расчлененным горным рельефом территории. В условиях нехватки пространственных данных одним из способов решения могут служить спутниковые снимки, возможность и актуальность использования которых обуславливается их доступностью, большим пространственным охватом, повторяемостью съемок и современными методами их обработки.

Возможность использования данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) в геокриологических исследованиях обусловлено тем, что в горных районах на формирование температуры пород (от которых зависит их состояние) влияет комплекс факторов, большинство из которых являются физиономичными и потому находят отражение на данных ДЗЗ. Такое обстоятельство дает возможность проводить ландшафтно-криоиндикационное исследование с помощью материалов спутниковой съемки. Помимо косвенных ландшафтных криоиндикаторов, имеет место прямое геокриологическое дешифрирование, в данном случае, по тепловому инфракрасному излучению поверхности ландшафта. Тепловая инфракрасная съемка показывает интенсивность излучения поверхности ландшафта в зависимости от состояния подстилающих пород и обычно обозначается термином «радиационная температура».

О возможности выявления мерзлых и талых пород по прямым признакам (цвету и плотности фототона на снимке) разные исследователи выдвигали предположение еще в 1970–1980-х гг. [Горный, Шилин, 1978; Некрасов и др., 1979], когда появились новые виды съемки: многозональная, инфракрасная и радиотеплолокационная. В настоящий момент тепловая инфракрасная съемка достаточно широко используется в исследовании многолетнемерзлых пород [Корниенко, 2007; Nachem et al., 2009]. Однако **детальных региональных исследований в горных районах криолитозоны с использованием и глубоким анализом этого параметра, наряду с анализом других температуроформирующих факторов, нет.** Проведение подобного исследования позволило автору разработать методику (алгоритм) выявления мерзлых и талых пород в горных районах криолитозоны, на примере Эльконского горного массива, состоящую из ландшафтных криоиндикаторов и вышеуказанного параметра [Калиничева и др., 2017].

Целью настоящей работы является апробация данной методики на примере Тарыннахского месторождения, расположенного на Олекмо-Чарском нагорье.

Участком исследования является центральная часть Тарыннахского месторождения, расположенная в междуречье рек Торго и В. Тарыннах, по вертикали от 700 до 1200 м. Климат рассматриваемого региона суровый. Среднегодовая температура воздуха на данной территории варьирует от -6 до -10 °С. Годовая амплитуда колебаний среднемесячных температур воздуха составляет $43-53$ °С [Караушева, 1977].

Рельеф района исследования является переходной зоной от Лено-Алданского плато к Олекмо-Чарскому плоскогорью и отличается значительным расчленением, большими абсолютными отметками (до 1300–1400 м) и представляет собой типичное нагорье (Мурун-Тарыннахский геоморфологический район). Нагорье сложено преимущественно кристаллическими породами архейского возраста.

Многолетнемерзлые породы (ММП) в этой области имеют прерывистое распространение и залегают на склонах северной и западной экспозиций, а также в подгольцовых и гольцовых областях водоразделов. Температура пород изменяется на водоразделах – от $+0,5$ до $-3,8$ °С, в седловинах, между водоразделами – от $+2,5$ до $+0,8$ °С, на нагорных террасах в подгольцовых зонах; от $+1,0$ до $+0,2$ °С [Железняк и др., 2014].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основных материалов для настоящих исследований были использованы данные о температуре горных пород в 13 скважинах, пробуренных глубиной от 10 до 250 м в разных ландшафтных условиях Тарыннахского месторождения (научно-технические отчеты Института мерзлотоведения). Данные по снежному покрову были проанализированы также по материалам научно-технических отчетов. В дальнейшем эти данные были интерпретированы с данными дистанционного зондирования Landsat-5/TM.

Для анализа рельефа использовались данные SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [<http://srtm.csi.cgiar.org>]. С помощью полученной цифровой модели были выделены уклоны поверхности и экспозиции склонов. Уклоны поверхности были распределены по следующим грациям: очень пологие ($2-5^\circ$), пологие ($5-10^\circ$), средние ($10-15^\circ$), крутые ($15-25^\circ$) и очень крутые (25° и выше).

Для изучения растительного и снежного покровов, а также радиационной температуры поверхности использовались космоснимки Landsat-5/TM (каналы 1–5 с разрешением 30 м и канал 6 (тепловой) с разрешением 120 м). Для изучения растительных сообществ в качестве индикатора многолетнемерзлых пород был использован августовский снимок 2011 г., который хорошо отражает фенологические особенности растительного покрова.

Анализ пространственной дифференциации растительного и снежного покровов производился по синтезу каналов 4–5–3 и 4–3–2 соответственно. Компенсация разницы освещенности северных и южных склонов при выделении растительных типов осуществлялась в программе ERDAS Imagine [<http://www.giscraft.ru/methods/method9.shtml>]. Для интерпретации типов растительности и высоты снежного покрова, мультиспектральные снимки разделялись на классы по методу неконтролируемой классификации [<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html>].

В качестве исходного снимка для выявления различий распределения мощности снежного покрова с учетом сезона разрушения снежного покрова на Тарыннахском месторождении был взят снимок 13 мая 2003 г., который анализировался со снимками с более поздней датой для выявления снежников. Для расчета радиационной температуры поверхности был выбран снимок 18 сентября 2009 г. исходя из времени, когда тепловые контрасты на изучаемой территории максимальны (период, когда сезонно-талый слой достигает наибольших значений, а сезонно-мерзлый полностью оттаивает) и растительный покров не создает экранирующего воздействия.

Для интерпретации радиационной температуры были учтены рекомендации выполнения тепловых съемок [Горный и др., 1993]. Вычисление значений радиационной температуры проводилось по методу, приведенному на сайте [<http://gis-lab.info/qa/dn2temperature.html>]. Для пространственно-временного анализа при работе с данными Landsat-5/TM использовались программы Multispec и ArcGis10.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние физико-географических факторов на формирование температуры пород

К физико-географическим факторам, влияющим на формирование температуры пород в горных районах, от которых зависит их состояние, относятся рельеф местности (высота, уклон и экспозиция), растительный и снежный покровы и ряд других.

Рельеф. Характер рельефа в формировании мерзлых горных пород играет особую роль. Положение участка в рельефе местности во многом определяет температурный режим пород через экспозицию склона, высоту над уровнем моря и является в этом отношении сильным и многообразно действующим фактором. При этом важна также и крутиз-

на склона, влияющая на угол падения солнечных лучей и, таким образом, на количество поглощенной солнечной радиации [Общее мерзлотоведение, 1978]. Под воздействием орографических факторов солнечная радиация, поступающая на поверхность, распределяется неравномерно. Это является главной причиной различий в микроклимате, глубине сезонного протаивания и формировании температуры поверхности.

Суточные суммы прямой солнечной радиации для склонов северной и южной экспозиций в горных областях юга Сибири были вычислены А.И. Караушевой [1977]. Было выявлено, что на северных и южных экспозициях, в зависимости от крутизны склонов, суточные суммы прямой солнечной радиации могут различаться в 2,3–2,4 раза. Так, по данным исследований максимальное количество солнечной радиации на северных склонах приходится на пологие склоны, а с ростом уклона поверхности ее количество понижается. На южных склонах приходится наибольшее количество солнечной радиации, однако в отличие от северных склонов, с ростом уклона поверхности сумма прямой солнечной радиации увеличивается.

Представленная картина приходящей солнечной радиации напрямую влияет на дифференциацию мерзлых и талых пород. Так, на северных склонах талые породы приурочены к пологим склонам, на южных склонах развиты в основном талые породы.

Растительный покров играет значительную роль в теплообмене земной поверхности с атмосферой, выступая в качестве промежуточной среды. С теплофизической точки зрения растительный покров представляет собой нечто среднее между воздухом и дисперсной средой. Именно этим свойством определяется их влияние на формирование температуры поверхности пород. В отличие от дисперсных сред растительный покров участвует в поглощении радиации и встречном излучении всем объемом [Общее мерзлотоведение, 1978].

В горных районах растительный покров (в зависимости от типа) разнонаправленно действует на температурный режим пород. Так, растительный покров при высокой сомкнутости крон оказывает охлаждающее влияние за счет поглощения солнечной радиации летом и уменьшения мощности снежного покрова зимой. Данным свойством обычно обладают лиственничные леса, которые характерны в основном на подножьях склонов наветренных экспозиций (северных, северо-западных и западных), а также местами на средних и высоких участках склонов, где они произрастают в ложбинных участках. Помимо вышеуказанного типа растительного покрова, наибольшей вероятностью развития мерзлых пород обладает тундровый растительный покров, представленный разреженным кедровым стлаником с фрагментами каменных развалов, а также участки без растительного покрова – каменные развалы с лишайниковыми ассоциациями. Заросли кедровых стлаников, лиственничные редколесья с кедровым стлаником и сосново-лиственничные леса на низкогорьях в определенных условиях могут развиваться как в мерзлых, так и в талых горных породах.

Снежный покров. Отепляющий эффект снега определяется мощностью и плотностью снежного покрова. Влияние снега на глубину сезонного промерзания и температуру горных пород подробно рассмотрено в работах В.А. Кудрявцева [1954], Г.М. Фельдмана [1977] и др.

В условиях резкоконтинентального климата и резкорасчлененного рельефа, снег является одним из наиболее действенных факторов, предохраняющих горные породы от охлаждения в зимний период, что приводит к повышению среднегодовых температур.

Под воздействием рельефа в горных районах изменяется циркуляция воздушных масс, определяющая снегоперенос в зимний период. В результате формируются участки с резко различной высотой снежного покрова. Помимо метелевого переноса большое влияние на снегонакопление оказывает микрорельеф поверхности, а также лесной и кустарниковый ярусы растительного покрова.

В исследуемом районе преобладают ветры преимущественно западных и северо-западных румбов. Поэтому северные, северо-западные, западные экспозиции склонов

являются наветренными. Высота снежного покрова на этих экспозициях варьирует от 10 до 90 см, в их пределах преимущественно развиты многолетнемерзлые породы.

Восточные, юго-восточные, южные и юго-западные экспозиции являются подветренными (высота снежного покрова 90 см и более). Здесь развиты преимущественно талые породы.

Северо-восточная экспозиция является переходной от наветренных экспозиций к подветренным и характеризуется мощностями снежного покрова от 40–90 см и выше. В пределах данной экспозиции часто формируются породы с температурой около $\pm 0^\circ\text{C}$.

Анализ теплового инфракрасного излучения участка исследования с натурными данными

Как отмечалось ранее, под действием вышеуказанных факторов изменяется температура пород, от которой в свою очередь зависит мерзлое или талое их состояние, что находит отражение в интенсивности теплового инфракрасного излучения поверхности (радиационной температуры). Как показал сопряженный анализ геотермических данных с данным параметром, меньшая интенсивность (низкие значения) радиационной температуры характерны для мерзлых пород, с повышением интенсивности данного параметра температура пород повышается и, соответственно, высокие значения радиационной температуры детектируют талые породы. Характер изменчивости радиационной температуры в идентификации мерзлых и талых пород и методика выявления мерзлых и талых пород с использованием данного параметра наряду с комплексом физиономических ландшафтных факторов описан в [Калиничева и др., 2017].

На рис. 1 представлена карта радиационной температуры в районе исследования. Сопоставление геотермических данных по скважинам и значений теплового инфракрасного излучения поверхности в районе Тарыннахского месторождения показало (табл.), что значения радиационной температуры от 8°C и ниже идентифицируют многолетнемерзлые породы, а радиационной температурой $9\text{--}12^\circ\text{C}$ фиксируются талые породы. Переходная радиационная температура $8\text{--}9^\circ\text{C}$ отражает породы с переходной температурой ($\pm 0^\circ\text{C}$). Участки с каменными развалами (курумы), под которыми развиваются мерзлые породы, фиксируются в разных ландшафтных условиях высокими значениями радиационной температуры ($9\text{--}20^\circ\text{C}$) из-за интенсивного прогревания их поверхности в теплый сезон.

Рассмотрим подробнее, наряду с анализом формирующих температуру пород физико-географических факторов.

Самые минимальные значения радиационной температуры ($< 5^\circ\text{C}$) наблюдаются на крутых и реже средних склонах наветренных экспозиций. На данных участках лишенных растительности снег имеет минимальные значения (10–40 см), местами фиксируются средние мощности снега (40–90 см) на участках с лиственничным лесом. В первом случае минимальные мощности снега, а в последнем, значительная затененность склона формируют суровые мерзлотные условия (скв. 106).

Далее повышение значения радиационной температуры ($5\text{--}6^\circ$) в области развития мерзлых пород (скв. 116) связано смягчением влияющих на температуру пород физико-географических факторов. Так, данные участки с радиационной температурой $5\text{--}6^\circ$ характерны на участках наветренных склонов и реже северо-восточной экспозиции преимущественно со средним уклоном. Последний фактор (уклон склона) обуславливает некоторое повышение приходящей солнечной радиации, но его, как правило, на склонах данных экспозиций недостаточно для формирования положительных среднегодовых температур пород.

Участки с значением радиационной температурой $6\text{--}7^\circ\text{C}$ отмечаются на верхних частях склонов наветренных и северо-восточной экспозиций с преимущественно пологим уклоном (скв. 49, 79). Формирование здесь минимальных (10–40 см), реже средних (40–90 см)

высот снежного покрова на каменных развалах и на густых лиственных лесах и зарослях кедровых стлаников обуславливают формирование на данных участках пород с отрицательной температурой.

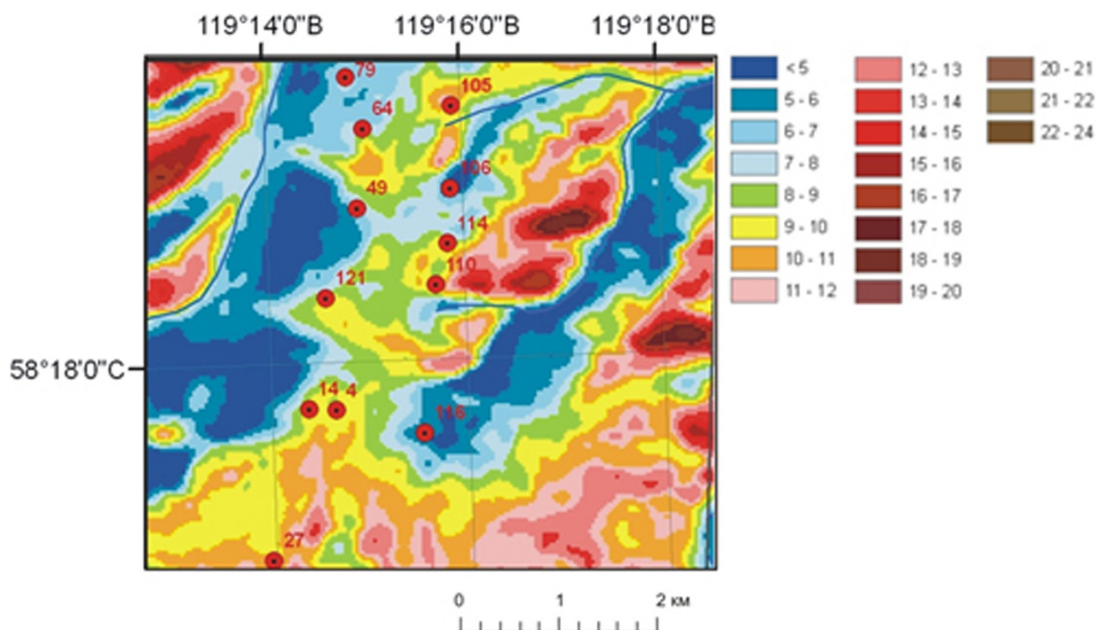


Рис. 1. Радиационная температура (тепловое инфракрасное излучение поверхности) на момент съемки 18.09.2009. Температура в легенде дана в °С

(Точки с цифрами) – номера геотермических скважин

Fig. 1. Radiation temperature (thermal infrared radiation of the surface) at the time of shooting 18.09.2009. The temperature in the legend is given in °С

(Points with numbers) – numbers of geothermal wells

Некоторые участки водораздела и приводораздельные пространства различных экспозиций (наветренных, северо-восточной и восточной) с очень пологим и пологим уклоном характеризуются значением радиационной температуры 7–8 °С. Здесь также отмечается развитие мерзлых пород (скв. 64). Более высокие значения радиационной температуры по сравнению с предыдущими связаны с увеличением количества приходящей солнечной радиации. Однако по разным обстоятельствам породы здесь имеют отрицательную температуру. Так, на наветренных экспозициях и местами в северо-восточных склонах почти повсеместно залегают каменные развалы, которые, как отмечалось выше, сильно охлаждаются в зимнее время. Отрицательные температуры на восточной и северо-восточной экспозициях связаны с охлаждающим влиянием снежников – снег своим поздним сходом снижает среднегодовую температуру пород.

Далее радиационная температура со значениями 8–9 °С интерпретируется согласно априорным данным, как породы с переходной температурой около 0 °С.

Участки с радиационной температурой 9–12 °С в основном идентифицируют талые породы, которые характерны в основном для подветренных экспозиций. Почти повсеместное развитие талых пород на подветренных склонах обусловлено мощным снежным покровом (в среднем 90–110 см и выше), а в летний период повышенным количеством прямой солнечной радиации. Также радиационной температурой 9–10 °С отмечаются талые породы на очень пологих наветренных экспозициях с максимальной мощностью снежного покрова (90–110 см).

Индикаторы мерзлых пород и таликов (фрагмент)
Indicators of permafrost and taliks (fragment)

Ландшафтные индикаторы			Фактические данные по температуре горных пород				Радационная температура (°C)
Экспозиция	Рельеф (Н: 700 – 1200 м)	Тип растительного покрова	Снежный покров, см	Состояние пород	Температура пород (°C)	№ Скважины	
Северо-западная	Пологий (5–10°) <i>Верхняя часть склона</i>	Каменные развалы	10–40	Мерзлые	–3,3	64	7–8
Северо-западная	Средний (10–15°) <i>Верхняя часть склона</i>	Лиственничные редины с зарослями кедровых стлаников	40–60	Мерзлые	–4,2	49	6–7
Юго-восточная	Пологий (5–10°) <i>Приповерхностная часть склона</i>	Заросли кедрового стланика	90–110	Талые	0,5	110	9–10
Юго-восточная	Средний (10–15°) <i>Средняя часть склона</i>	Лиственничные редины с зарослями кедровых стлаников	90–110	Талые	0,7	107	10–11

Исключение составляют лишь небольшие участки наветренных экспозиций с очень пологим уклоном, где на поверхности залегают каменные развалы, которые в теплые сезоны сильно нагреваются и в виду этого отображаются температурой 9–10 °С. Однако данные участки в зимнее время также сильно охлаждаются и вследствие этого тут формируются породы с отрицательной температурой.

Как отмечалось ранее, на подветренных склонах с ростом уклона растет количество приходящей солнечной радиации. Так, значение радиационной температуры 9–10 °С характерна для пологих склонов подветренных экспозиций (скв. 4, 27, 110), радиационная температура 10–11 °С отображает участки талых пород залегающих преимущественно на средних склонах (скв. 105, 107), а 11–12 °С – на крутых склонах. Исключение составляют, как и повсюду, каменные осыпи (курумы), на которых и в подветренных экспозициях развиваются мерзлые породы.

Представленный в настоящей работе сжатый анализ фактических геотермических данных с выделением влияния каждого ландшафтного фактора (уклона, экспозиции склона, растительности и снежного покрова) и интенсивности радиационной температуры отображает суть разработанного ранее алгоритма – методики выявления мерзлых и талых пород в горных районах криолитозоны.

Алгоритм предусматривает оверлей (наложение) рассмотренных нами отдельных слоев – рельефа, растительности, снежного покрова, радиационной температуры. Суть картографирования мерзлых пород состоит в последовательном картографировании и уточнении границ по выбранным природным факторам. Сочетание рельефа и растительности считается основой картографирования ландшафтов [1978]. А.Н. Федоров [1991] этот принцип использовал при дифференциации различных классификационных единиц мерзлотных ландшафтов.

На ландшафтную основу (сочетание рельефа и растительности) накладываются карты мощности снежного покрова, что уточняет условия промерзания грунтов, формирование и состояние мерзлых пород. Дальнейшее наложение карты радиационной температуры еще раз уточняет состояние ландшафтов, дифференцируя мерзлые и талые горные породы. Так, по результатам исследования, была составлена карта-схема Олекмо-Чарского нагорья (Тарыннахского месторождения) (рис. 2).

ММП преимущественно занимают горнотаежные ландшафты, также распространены на горноредколесных и подгольцовых ландшафтах – занимают 67 % территории исследования.

Талые породы занимают 22 % территории. Развита также на горноредколесных и подгольцовых ландшафтах.

Породами с переходной температурой (± 0 °С) занято 11 % исследуемой территории.

По сравнению с традиционным геокриологическим картографированием по методике В.А. Кудрявцева [Общее мерзлотоведение, 1978], где породы дифференцируются в основном как островные ММП (до 30 % площади), массивно-островные (до 50 % площади), прерывистые (от 50 до 90 %) и т. д., данная методика позволяет конкретно выделить участки с мерзлыми и талыми породами. Однако имеются некоторые ограничения при картографировании по этой методике, это: 1) Выбор сезона (даты) теплового снимка наиболее подходящего для достоверной идентификации состояния пород, который, в свою очередь, зависит от климатических условий исследуемого региона; 2) Устранение теневого эффекта северных склонов гор при выделении типов растительных ассоциаций на материалах спутниковых снимков, например, посредством метода топографической нормализации; 3) Обязательное проведение снегомерных съемок в подобных мерзлотных исследованиях; 4) Выборка репрезентативных геокриологических данных.

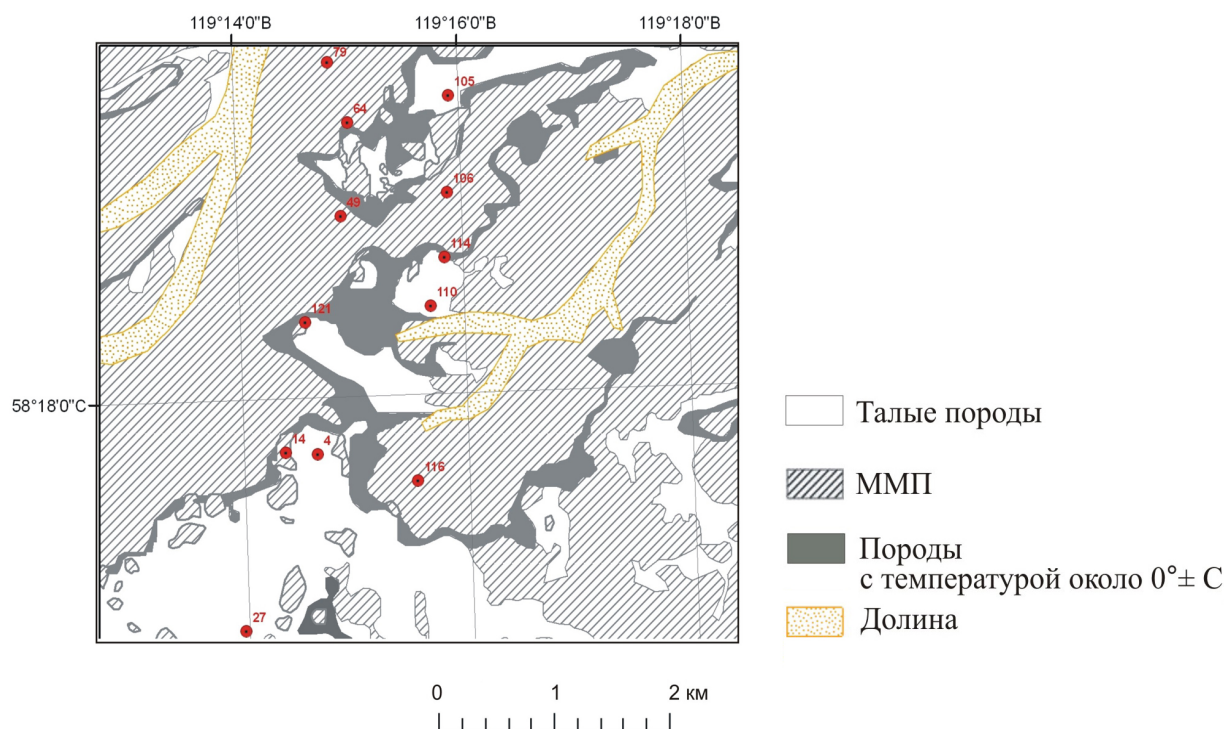


Рис. 2. Фрагмент карты распространения мерзлых пород
Олекмо-Чарского нагорья (Тарыннахского месторождения)

(Точки с цифрами) – номера геотермических скважин

Fig. 2. Fragment of the map of the distribution of permafrost
of the Olekma-Charskiy upland (Tarynnakhskoye deposit)

(Points with numbers) – numbers of geothermal wells

Несмотря на специфичные требования, выделение и картографирование многолетнемерзлых пород с применением теплового инфракрасного снимка достаточно широко используется исследователями разных стран [Westermann et al., 2015; Zhao et al., 2017; etc.], что, в свою очередь, подтверждает актуальность данной методики.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований по предложенной методике в районе Тарыннахского месторождения по комплексу ландшафтных факторов и радиационной температуре были выявлены особенности распространения многолетнемерзлых и талых пород.

Установлено, что интенсивность радиационной температуры изменяется в зависимости от состояния пород (мерзлое или талое) и зависит от влияния комплекса факторов. Так, по тепловому снимку (18.09.2009) талые породы идентифицируются значением радиационной температуры от 9 до 12 °С. Породы с переходной температурой (± 0 °С) фиксируются радиационной температурой 8–9 °С, а ММП выделяется радиационной температурой ниже 8 °С (на курумах 9–20 °С).

Повторная апробация разработанной методики подтвердила возможность ее использования для исследования многолетнемерзлых пород в горных районах криолитозоны. Использование этой методики в режиме мониторинга позволит дать качественную информацию об изменении состояния пород криолитозоны горных районов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горный В.И., Шилин Б.В. Применение тепловой аэросъемки для целей инженерно-геологических исследований в районах развития многолетней мерзлоты // Методика инженерно-геол. исслед. и картирования обл. вечной мерзлоты. Якутск, 1978. С. 85–96.
2. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
3. Железняк М.Н., Жижин В.И., Сериков С.И. Геокриологические условия Олекмо-Чарского поднятия в зоне проектируемых линейных сооружений на участке Икабьекан-Тарыннах // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 1675.
4. Калинин С.В., Железняк М.Н., Кириллин А.Р., Федоров А.Н. Выявление и картографирование мерзлых участков с использованием космических снимков (на примере Эльконского горста в Южной Якутии) // Наука и образование. 2017. № 3. С. 30–37.
5. Караушева А.И. Климат и микроклимат района Кодар-Чара-Удокан. Л.: Гидрометеопиздат, 1977. 128 с.
6. Корниенко С.Г. Особенности применения теплового метода для изучения и мониторинга мерзлых грунтов // Бурение и нефть. 2007. № 7–8. С. 72–75.
7. Кудрявцев В.А. Температура вечномерзлой толщи в пределах СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 182 с.
8. Некрасов И.А., Делеур М.С., Дорофеев И.В., Грибанова С.П. Геокриологическое картирование Южной Якутии по аэрокосмическим снимкам // Региональные и криолитологические исследования в Сибири. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1979. С. 3–16.
9. Общее мерзлотоведение (геокриология) / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 464 с.
10. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 318 с.
11. Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН СССР, 1991. 140 с.
12. Фельдман Г.М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 191 с.
13. Westermann S., Ostby T., Gissnas K., Schuler T., Etzelmuller B. A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 1303–1319. DOI: 10.5194/tc-9-1303-2015.
14. Zhao S., Nan Z., Huang Y., Zhao L. The Application and Evaluation of Simple Permafrost Distribution Models on the Qinghai-Tibet Plateau // Permafrost and Periglacial Processes. 2017. No 2. P. 391–404.
15. Hachem S., Allard M., Duguay C. Using the MODIS Land Surface Temperature Product for Mapping Permafrost: An Application to Northern Quebec and Labrador, Canada // Permafrost and Periglacial Processes. 2009. No 20. P. 407–416.

REFERENCES

1. Fedorov A.N. Permafrost landscapes of Yakutia: a selection technique and mapping issues. Yakutsk: Institute of Permafrost Studies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, USSR, 1991. 140 p. (in Russian).
2. Feldman G.M. Forecast of temperature regime of soils and development of cryogenic processes. Novosibirsk: Science. Sib. Otd-tion, 1977. 191 p. (in Russian).
3. General permafrost studies (geocryology). Ed. V.A. Kudryavtseva. M.: Mosk. University Publ., 1978. 464 p. (in Russian).

4. *Gorny V.I., Shilin B.V.* Application of thermal aerial survey for the purposes of engineering and geological research in the areas of development of permafrost. In: *Technique of Engineering and Geology. Issled. and mapping of the region. permafrost.* Yakutsk, 1978. P. 85–96 (in Russian).
5. *Gorny V.I., Shilin B.V., Yasinsky G.I.* Thermal aerospace survey. M.: Nedra, 1993. 128 p. (in Russian).
6. *Hachem S., Allard M., Duguay C.* Using the MODIS Land Surface Temperature Product for Mapping Permafrost: An Application to Northern Quebec and Labrador, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2009. No 20. P. 407–416.
7. *Kalinicheva S.V., Zheleznyak M.N., Kirillin A.R., Fedorov A.N.* Identification and mapping of permafrost using satellite images (on the example of the Elkon mountain in Southern Yakutia). *Science and education*. 2017. No 3. P. 30–37 (in Russian).
8. *Karausheva A.I.* Climate and microclimate of the Kodar-Chara-Udokan district. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 128 p. (in Russian).
9. *Kornienko S.G.* Peculiarities of the application of the thermal method for studying and monitoring permafrost. *Burenie i nef't*. 2007. No 7–8. P. 72–75 (in Russian).
10. *Kudryavtsev V.A.* Temperature of permafrost within the USSR. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. 1954. 182 p. (in Russian).
11. *Nekrasov I.A., Deleur M.S., Dorofeev I.V., Gribanova S.P.* Geocryological mapping of Southern Yakutia by aerospace imagery. *Regional and cryolithological studies in Siberia*. Yakutsk: Institute for Permafrost Studies, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1979. P. 3–16 (in Russian).
12. *Sochava V.B.* Introduction to the theory of geosystems. Novosibirsk: Science, 1978. 318 p. (in Russian).
13. *Westermann S., Ostby T., Gissnas K., Schuler T., Etzelmuller B.* A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 1303–1319. DOI: 10.5194/tc-9-1303-2015.
14. *Zhao S., Nan Z., Huang Y., Zhao L.* The Application and Evaluation of Simpl Permafrost Distribution Models on the Qinghai-Tibet Plateau. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2017. No 2. P. 391–404.
15. *Zheleznyak M.N., Zhizhin V.I., Serikov S.I.* Geocryological conditions of the Olekma-Charsky highland in the zone of projected linear structures on the Ikabekan-Tarynnakh section. *Modern problems of science and education*. 2014. No 6. P. 1675 (in Russian).

Каргашин П.Е.¹

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА ПО СНИМКАМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Одним из важных этапов работ при географических исследованиях территорий добычи нефти и газа является инвентаризация техногенных объектов, а при решении производственных задач периодически возникает необходимость обновления карт. При выполнении экологической оценки территории крайне важно знать актуальное местоположение производственных объектов, а материалы экспедиционных исследований или качественные картографические материалы не всегда есть в наличии. В таком случае работы выполняются с применением различных данных дистанционного зондирования, при этом их выбор, как правило, обусловлен их доступностью, а не разрешением. Анализ работ по использованию космических снимков при изучении месторождений показал, что крайне мало внимания уделяется дешифрированию собственно инфраструктуры месторождений, распознаванию типов объектов, хотя корректное определение типа объекта важно, например, для выявления его потенциального воздействия на природную среду.

В рамках данной статьи рассмотрены особенности изображения площадных и линейных объектов нефтегазовых месторождений на снимках Landsat и систематизированы приемы визуального анализа изображений для точного и достоверного распознавания объектов добычи углеводородов на основе прямых и косвенных дешифровочных признаков. Суть предлагаемой методики состоит в поэтапном выделении разных типов объектов, анализе их функциональных связей, применении знаний о принципах организации работ на месторождении.

Исследование выполнялось на примере Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения, где размещены наиболее типичные объекты добычи и транспорта газа. В статье приведены фрагменты схем дешифрирования, иллюстрирующие этапы работы. Установлено, что снимки 30-метрового разрешения имеют значительный информационный потенциал и могут дать полную характеристику инфраструктуры месторождения, а не только локализовать нарушенные при освоении территории земли. Данная методика может быть использована в дальнейшем для оптимизации автоматизированного дешифрирования снимков высокого разрешения на территории добычи углеводородов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космический снимок, визуальное дешифрирование, дешифровочные признаки, нефтегазоконденсатное месторождение, объекты инфраструктуры, кусочная площадка, трубопровод.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: p.e.kargashin@mail.ru

Pavel E. Kargashin¹

VISUAL INTERPRETATION OF OIL AND GAS CONDENSATE FIELD FACILITIES FROM LANDSAT IMAGES

ABSTRACT

The inventory of man-made objects (for example, within the framework of an environmental study) is often necessary for surveys of oil and gas production areas. But a literature review of similar researches reveals that little attention has been paid to interpreting oil and gas field facilities themselves, as well as to recognizing the types of objects in satellite images of these areas.

This article considers the image characteristics of areal and linear objects of oil and gas condensate fields in Landsat satellite images. It also considers methods of visual analyzing of space images for the accuracy and reliability of those objects recognized on the basis of direct and indirect interpretation features.

The essence of the proposed technique consists in the step-by-step recognition of various types of objects, in an analysis of their functional relations, and in the application of knowledge about the principles of work organization at oil and gas condensate fields.

This article presents fragments of interpretive schemes that illustrate stages of work, taking as an example the Zapolyarnoye oil and gas condensate field. The author's research results show that images of 30 m resolution have a significant information potential, and at the same time can provide for a complete description of field infrastructure.

The application of the technique presented in this article is considered in the context of visual interpretation. However, it can become a foundation of automated work on the basis of image-classification algorithms. Another obvious direction is the use of this method in the preliminary analysis of a territory and, using ultra-high-resolution images, in the positioning of technical objects for subsequent specification of their characteristics.

KEYWORDS: satellite image, visual interpretation, interpretation features, oil and gas condensate field, infrastructure facilities, multiple-well platform, pipeline.

ВВЕДЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования достаточно давно применяются в нефтегазовой отрасли. Спектр частных направлений их использования представлен в обзорных публикациях и монографиях [Аэрокосмический мониторинг объектов..., 2012]. Например, материалы аэро- и космической съемки применяются для разведки недр [Макриденко и др., 2008; Трофимов, 2009], оценки воздействия на природную среду [Елсаков, 2012; Yu et al., 2015] и в других направлениях научной и хозяйственной деятельности.

Более того, в нормативной документации, регламентирующей инженерные изыскания для строительства [СП 47.143330.2012], предписано использовать космические снимки в рамках изучения фондовых материалов. Раздел 8 этого документа, посвященный инженерно-экологическим изысканиям, содержит указание на ряд важных направлений, в которых должны использоваться данные дистанционного зондирования. Важнейшим звеном геоэкологического анализа территории месторождения является выявление объектов инфраструктуры, т. е. источников воздействия на природу. В СП

¹ Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: p.e.kargashin@mail.ru

47.143330.2012 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» указано, что дешифрирование следует выполнять для оценки экологической обстановки, получения ретроспективных данных.

Инвентаризация инфраструктуры месторождения необходима для выполнения различных работ, например, при выполнении реконструкции объектов или планирования нового строительства следует давать характеристику техногенных условий, изменений экологического состояния, существующих источников воздействия на окружающую среду и т. д. Такое описание может быть выполнено только при наличии специфических фондовых данных или на основе дешифрирования космических снимков.

Данные дистанционного зондирования позволяют не только получить актуальную информацию, но и выполнить ретроспективный анализ, проследить изменения количества объектов и занимаемой ими площади, а также оценить их воздействие. Однако возможности данных дистанционного зондирования не ограничиваются созданием карт, они также полезны при получении количественной информации об освоенности территории, количестве техногенных объектов, рисках (например подтопление площадок) и т. д., что необходимо при текстовой оценке современного экологического состояния территории.

Геоэкологический аспект использования данных дистанционного зондирования, как правило, заключается в оценке состояния систем, включающих компоненты природной среды и техногенные объекты добычи и транспорта углеводородов. Основным объектом изучения и, как следствие, дешифрирования космических снимков является антропогенное воздействие на природные сообщества в пределах месторождений и территорий строительства трубопроводов. Такие исследования выполнялись, например, для Тазовского полуострова [Корниенко, 2011], Оренбургской области [Мячина, Дубровская, 2013], Ямало-Ненецкого автономного округа [Шарикалов, Якутин, 2011] и для многих других территорий размещения объектов добычи и транспортировки углеводородов.

В публикациях подчеркивается многообразие проявлений антропогенного воздействия на окружающую среду [Копылов и др., 2009; Абросимов и др., 2011]. Оно в значительной степени связано с разнообразием объектов и технологических процессов, обеспечивающих извлечение, подготовку и транспортировку углеводородов даже в пределах отдельного месторождения. Таким образом, важно не только выявить техногенно измененные территории, но и определить ключевые источники воздействия, т. е. элементы производственной инфраструктуры месторождений.

В научных публикациях и нормативных документах можно встретить лишь единичные упоминания о проблемах выявления техногенных объектов месторождений по космическим снимкам. В работе [Kumpula et al., 2010] приведены примеры дешифрирования и оценена возможность их распознавания по космическим снимкам различного разрешения. Чаще всего различные авторы упоминают о том, что объекты выделены посредством визуального [Елсаков, Щанов, 2004] или автоматизированного [Шарикалов, Якутин, 2014; Каргашин и др., 2016] дешифрирования снимков. Это зачастую связано с тем, что данный аспект лежит вне областей выполняемых исследований. Нормативные документы также не дают достаточной информации по методикам распознавания объектов нефтегазовой отрасли [Методические рекомендации..., 1995].

Схожесть спектральных образов антропогенных объектов и некоторых природных сообществ часто приводит к ошибочному отнесению природных объектов к техногенным или, наоборот, к отсутствию производственных площадок на схемах дешифрирования. Такие неточности возникают не только в случае автоматизированной классификации, но и при визуальном дешифрировании снимков [Каргашин, Карпачевский, 2015]. В связи

с этим важной становится выработка принципиальной последовательности работ, основанной на детальном знании объектов дешифрирования и географических особенностей территории исследований.

Выполненный анализ литературных источников позволил сформулировать цель исследования, которая состоит в поиске оптимальной последовательности дешифрирования инфраструктуры месторождений углеводородов, повышении достоверности распознавания источников воздействия на окружающую среду.

Такая цель потребовала решения ряда задач, среди которых: изучение принципов подготовки территории и сооружения производственных объектов месторождения нефти и газа; оценка геометрических и спектральных свойств данных дистанционного зондирования высокого разрешения; определение дешифровочных признаков отдельных объектов производственной инфраструктуры; оптимизация последовательности дешифрирования; оценка полученных результатов путем сравнения со снимками сверхвысокого разрешения.

Итогом работ стала методика визуального анализа изображений площадочных и линейных объектов месторождений нефти и газа на снимках Landsat для точного и достоверного распознавания этих объектов на основе прямых и косвенных дешифровочных признаков (на примере Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения). Новизной в данной работе является определение оптимальной последовательности дешифрирования объектов инфраструктуры месторождения, которая определяется их функциональными и пространственными связями. Это не менее важно, чем описание дешифровочных признаков отдельных линейных или площадочных объектов.

Предлагаемая методика оптимальна для применения на разных этапах инженерно-экологических изысканий, при изучении территории для расширения производства, для строительства новых объектов инфраструктуры месторождений. Применение данной методики в рамках инженерно-экологических изысканий возможно в рамках подготовительного этапа для обоснования состава и объемов работ, для выявления потенциальных источников воздействия на почвенный покров, растительность, водные объекты и т. д., а также как при описании природных и техногенных условий, хозяйственного использования территории, что необходимо включать в отчетную документацию.

Новизна рассматриваемого аспекта использования снимков высокого разрешения для инженерно-экологических изысканий заключается в том, что показан способ извлечения информации об инфраструктуре месторождений, который позволяет использовать получаемые результаты при планировании работ и написании отчета в качестве независимого источника информации, по которому следует проверять актуальность и достоверность фондовых, в том числе картографических данных о территории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным источником данных были космические снимки со спутников Landsat, которые активно используются при геоэкологических исследованиях из-за их доступности и наличия архива съемки за несколько десятилетий. Основные характеристики съемочных систем и снимков представлены на веб-сайте Геологической службы США [<http://landsat.usgs.gov>].

Исследуемая территория – Заполярное нефтегазоконденсатное месторождение, которое осваивается с середины 90-х гг. и расположено в Ямало-Ненецком автономном округе. С точки зрения природных условий месторождение находится в лесотундровой зоне, в районах распространения многолетнемерзлых пород.

Анализ существующих технологий добычи и подготовки углеводородов на месторождении [Коршак, Шаммазов, 2001] позволяет составить перечень объектов дешифрирования, в который входят основные (кустовые площадки, установки подготовки и пере-

работки сырья, трубопроводы) и вспомогательные (населенные пункты, карьеры, дороги, линии электропередачи, линии связи и т. д.) площадочные и линейные объекты. Перечисленные объекты не отражают абсолютно все их типы, но этого вполне достаточно для того, чтобы представить инфраструктуру месторождения. Следует отметить, что разрешение снимков Landsat может не позволить распознать все указанные объекты из приведенного списка. В первую очередь это относится к линиям связи и электропередачи. С другой стороны, наиболее значимые и важные с точки зрения экологической оценки объекты имеют достаточную площадь для распознавания по снимкам Landsat.

Специфика данной предметной области и исследуемой территории такова, что при выборе снимков следует придерживаться следующих критериев: минимум облачности, бесснежный период (с мая по сентябрь), время суток – день. Для Заполярного месторождения и многих других территорий нефтегазодобычи эти критерии исключают возможность применения значительной части снимков. Например, на портале EarthExplorer [<https://earthexplorer.usgs.gov/>] за 2016 г. на территории Заполярного месторождения есть 54 снимка, и из них из-за облачности (пороговое значение – 10 % от площади сцены), времени суток, сезона исключается 45 снимков, т. е. около 90 %. Следовательно, крайне важно обеспечить максимально возможное извлечение информации из имеющихся данных дистанционного зондирования. При таком обеспечении исходными данными практически не стоит вопрос о выборе наиболее подходящих материалов, а дешифрирование выполняется на основе тех снимков, которые есть.

Подготовительная работа с данными дистанционного зондирования заключается в геометрической и радиометрической коррекции изображения, а также в выборе оптимального варианта синтеза для достаточно четкого и контрастного отображения именно антропогенных объектов.

На рис. 1 показан фрагмент снимка со спутника Landsat-8 центральной части Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения. Изображение получено при синтезе каналов SWIR, RED и BLUE, длины волн 1,560–1,660 мкм; 0,630–0,680 мкм; 0,450–0,515 мкм, соответственно. Такой вариант синтеза является достаточно удобным для распознавания техногенных объектов. Видно, что спектральные образы отдельных природных объектов близки к таковым для антропогенных объектов. Изучение специфики отображения техногенных и природных объектов, представленных на данном снимке, позволило определить типичные черты каждого объекта. Результатом предварительного анализа снимка является перечень дешифровочных признаков, представленный в табл. Выявленные для каждого типа объектов признаки послужили основой для создания схемы дешифрирования и формулировки принципиальной последовательности для выполнения работ.

Суть предлагаемой методики дешифрирования объектов добычи углеводородов заключается в поэтапном распознавании объектов разных типов и постепенном наполнении схемы дешифрирования содержанием. В данной методике важна последовательность дешифрирования объектов.

На первом этапе выполняется дешифрирование сети автодорог, которые связывают все площадочные объекты. Дороги, проложенные в пределах нефтегазовых месторождений, достаточно четко отображаются на снимке за счет ярко белого цвета и однородной структуры.

На втором этапе выявляются площадные объекты месторождения с учетом уже известной конфигурации дорожной сети. На данном этапе также выполняется определение типов выделенных объектов исходя из формы и размеров выделенных площадок. Площадные объекты месторождения имеют ярко-белый цвет из-за песчаной отсыпки, а очертания объектов – правильные. Представляется возможным различить кустовые площадки и территории комплексной подготовки нефти или газа. Цвет кустовых, как правило, белый, а для установок комплексной подготовки газа (УКПГ) цвет отдельных частей площадки может быть

голубым. Это объясняется различным составом объектов и сооружений в пределах кустовой площадки или площадки УКПГ и хорошо заметно при изучении снимков сверхвысокого разрешения. Также эти объекты существенно различаются по размеру и форме.

На третьем этапе выполняется распознавание трубопроводов, которые можно выявить по косвенным дешифровочным признакам по причине их подземной прокладки. При определении трубопроводов следует сначала определить те участки, которые ярко проявляются на снимке, а восстанавливать пропущенные участки трубопроводов лучше в завершение этого этапа.

Четвертый этап завершает процесс дешифрирования и заключается в проверке корректности определения типов объектов и их местоположения на основе совместного анализа всех объектов, выделенных на разных этапах работ.

Дешифровочные признаки некоторых объектов Заполярного месторождения по снимку съемочной системы OLI (Landsat-8). Синтез SWIR-RED-BLUE
Interpretation features of the main types of objects within Zapolyarnoye gas field for image taken by OLI camera (Landsat-8). Band combination SWIR-RED-BLUE

Объект	Природный/ Техногенный	Дешифровочные признаки		
		Геометрические	Яркостные Цвет	Структурные
Кустовая площадка	Техногенный	Прямоугольник, размер небольшой	Белый	Однородная текстура и структура
УКПГ	Техногенный	Многоугольник, форма сложная, по размеру больше чем кустовая площадка	Белый и голубой	Неоднородная структура
Дорога	Техногенный	Узкая тонкая полоса	Белый	Почти всегда однородная текстура и структура
Трубопровод	Техногенный	Узкая тонкая полоса	Белый-голубой-желтый	Штриховая неоднородная структура (сочетание участков разного цвета)
Озера	Техногенный	Зачастую округлая	Черный	Однородная текстура и структура
Тундровые мохово-лишайниковые комплексы	Природный	Форма неправильная, занимают большие площади	Белый	Пятнистая структура
Пойменные таежные комплексы	Природный	Форма неправильная, небольшие по размерам	Оттенки красного	Однородные
Заболоченные комплексы	Природный	Форма неправильная	Оттенки желтого и красного	Пятнистая структура
Песчаные отмели	Природный	Узкие полосы, размер небольшой	Белый	Однородная текстура и структура



Рис. 1. Центральная часть Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения
 Fig. 1. The central part of Zapolyarnoye gas field

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Итогом исследований стала методика, основанная на дешифрировании производственных объектов нефтегазоконденсатного месторождения по снимкам Landsat, которая позволяет учесть специфику этих объектов (были выявлены типичные черты каждого из них, наиболее важные из которых – средний размер, специфическая форма, взаимное расположение структурных частей и цвет) и получить корректные результаты.

Исследование показало, что объекты нефтегазового комплекса спорадически располагаются в пределах лицензионного участка и не занимают его площадь целиком, а перемежаются с природными объектами. Важным является тот факт, что все антропогенные объекты месторождения связаны между собой и могут быть представлены в виде «единого контура сложной конфигурации». Такой результат часто получается в результате применения автоматизированных методов дешифрирования [Каргашин, Карпачевский, 2015].

Дешифрирование транспортной сети является начальным этапом работ, это позволяет определить границы участка, используемого в производстве. Площадь территории, на которой фактически ведется добыча, может значительно отличаться от лицензионного участка или площади горного отвода.

Дороги достаточно четко определяются по снимкам высокого разрешения и проявляются в виде узких полос ярко-белого цвета и однородной текстуры. На рис. 2 представлен фрагмент снимка Landsat с выделенными дорогами.

Изучение площадных объектов позволило получить следующие результаты. В пределах исследованной территории было выявлено 27 кустовых площадок. Их периметр варьирует от 750 до 1800 м, в среднем составляя 1400 м. Их площадь меняется в пределах 0,026–0,058 км² при среднем значении 0,037 км². Установки комплексной подготовки газа больше кустовых площадок примерно на порядок и занимают площадь от 0,25 до 0,65 км². Они имеют более сложную конфигурацию за счет большего количества производственных участков.

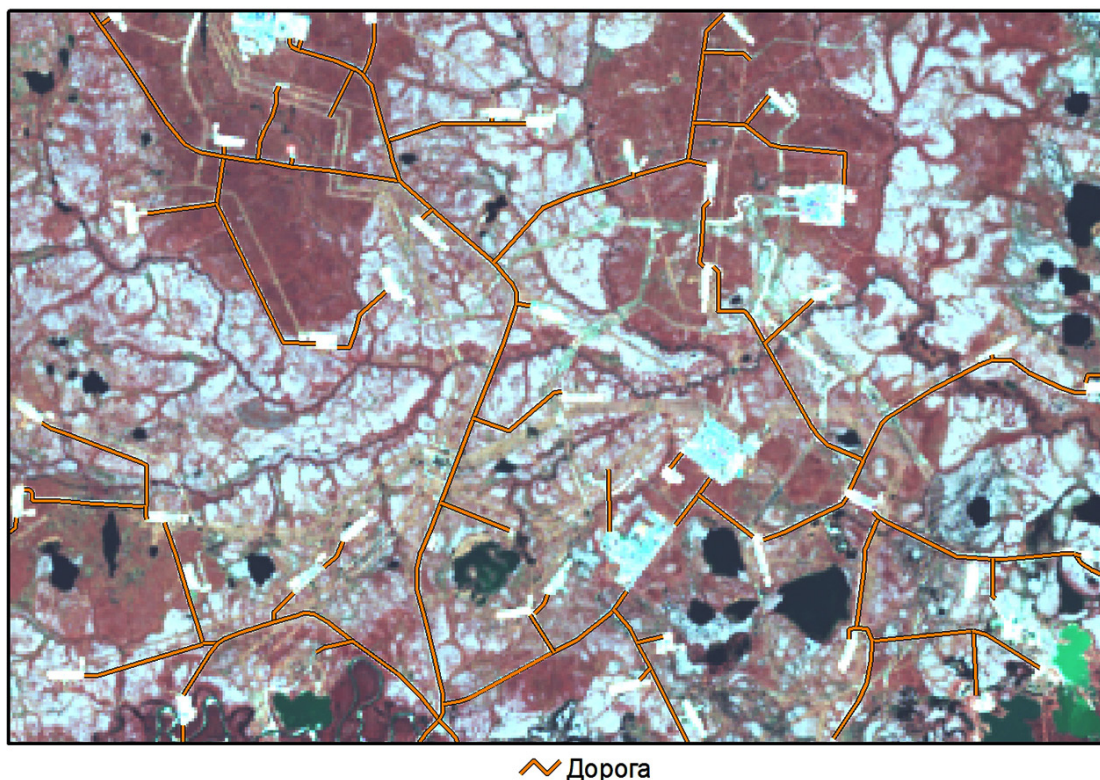


Рис. 2. Дорожная сеть Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения
Fig. 2. Road network of Zapolyarnoye gas field

Наиболее сложный этап работ связан с дешифрированием трубопроводов. По снимкам распознаются фрагменты надтрубных валов и протяженные участки нарушенного почвенно-растительного покрова исходя из их специфической текстуры, формы и цвета. Однако эти элементы изображения не являются абсолютно достоверными, в связи с тем, что надтрубные валы со временем разрушаются. Поэтому непосредственно по снимку возможно проследить только фрагменты трубопроводов. Сложность представляют также участки параллельного прохождения нескольких труб, на которых затруднительно определить положение каждой нитки. В таких случаях достаточно ограничиться показом коридора, в котором проходит несколько ниток трубопроводов.

Наиболее перспективно при дешифрировании таких объектов использовать уже выделенные площадные объекты, так как трубопроводы проходят от кустовых площадок до установок комплексной подготовки газа. Именно в этом направлении и целесообразно их трассировать. Более того, по снимкам можно четко определить сгущение трубопроводов при приближении к УКПГ.

Рис. 3 демонстрирует итог дешифрирования всех техногенных объектов Заполярного месторождения, на нем показаны площадные и линейные объекты, выделенные по снимку Landsat-8.

Таким образом, по снимкам, полученным со спутников Landsat, доступных для специалистов научных и учебных организаций, представляется возможным не только показать расположение техногенных объектов, но и определить основные типы: кустовые площадки, установки комплексной подготовки газа, трубопроводы и дороги. Составленная схема дешифрирования отражает положение технических объектов месторождения с точностью, соответствующей исходным материалам – снимкам 30-метрового разрешения.

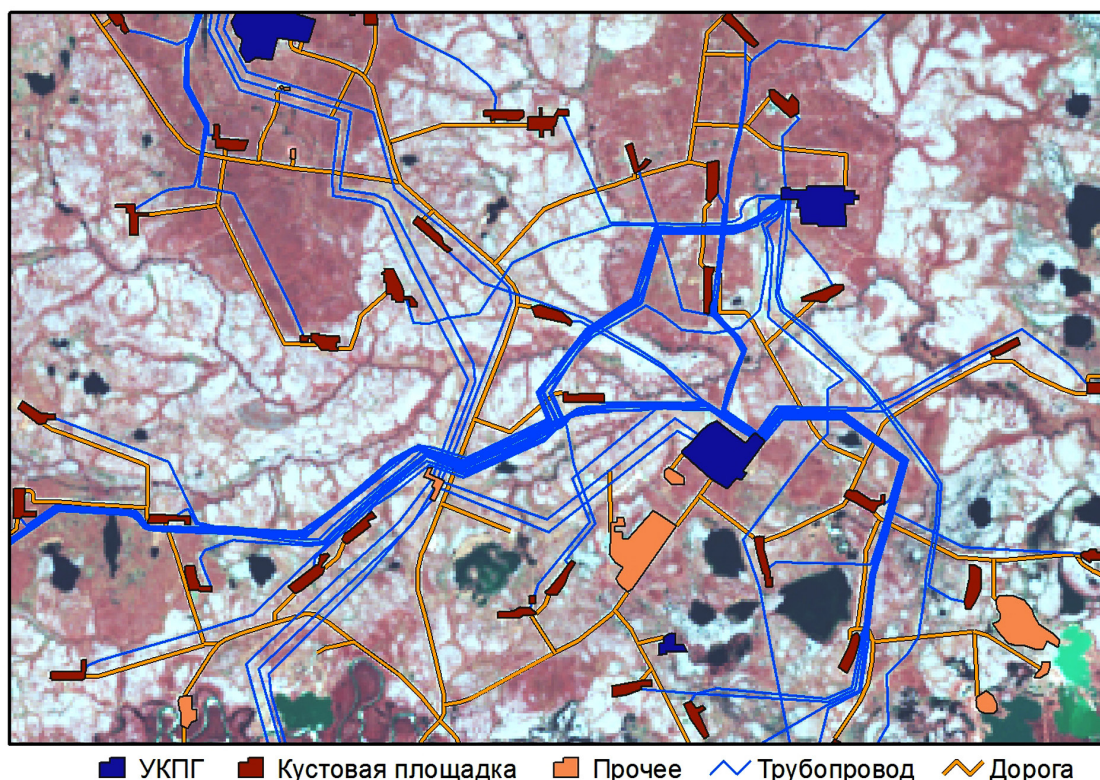


Рис. 3. Схема дешифрирования техногенных объектов

Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения

Fig. 3. The complete scheme of technogenic objects of Zapolyarnoye gas field

ВЫВОДЫ

В данной статье представлена процедура последовательного дешифрирования техногенных объектов нефтегазоконденсатного месторождения по изображениям, полученным со спутников Landsat, которая позволяет получить корректные результаты даже по снимкам 30-метрового разрешения. Изложенная методика показана на примере визуального дешифрирования, но может быть использована и для автоматизации работ на основе алгоритмов классификации изображений. Например, дешифрирование дорожной сети за счет ярко-белого цвета изображений дорог может быть выполнено автоматически даже на основе кластеризации. Дорожная сеть, в свою очередь, является основанием для задания буферной зоны, в которой находятся площадочные объекты и для создания маски, за пределами которой дешифрирование площадочных объектов и трубопроводов выполнять нецелесообразно.

Очевидным направлением применения данной методики является также предварительный ландшафтный анализ территории и специфики расположения технических объектов для последующего уточнения их характеристик по снимкам сверхвысокого разрешения.

Практическое использование полученных результатов возможно при экологических исследованиях территорий добычи нефти и газа, планировании дополнительных изысканий, то есть в тех случаях, когда необходимо учитывать существующую структуру месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов А.В., Беленов А.В., Брагин Е.А. Космический контроль недропользования и природопользования // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2011. № 12. С. 38–42.

2. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. 558 с.
3. *Елсаков В.В.* Спутниковая съемка в экологическом мониторинге регионов добычи углеводородов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 5. С. 133–139.
4. *Елсаков В.В., Щанов В.М.* Дистанционный мониторинг разновременных нарушений растительного покрова в районах добычи и транспортировки нефти // **Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.** 2004. № 1. С. 152–155.
5. *Каргашин П.Е., Карпачевский А.М.* Автоматизация дешифрирования механических нарушений территории в лесотундровой зоне // Инновационная наука. 2015. № 12. С. 263–268.
6. *Каргашин П.Е., Новаковский Б.А., Карпачевский А.М., Каргашина М.А.* Сравнительная характеристика методов автоматизированной обработки снимков Landsat для дешифрирования месторождений газа в лесотундровой зоне // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. Т. 60, № 5. С. 100–104.
7. *Копылов В.Н., Кочергин Г.А., Полищук Ю.М., Хамедов В.А.* Использование данных ДЗЗ при решении региональных задач рационального природопользования // **Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.** 2009. Т. 1, № 6. С. 33–41.
8. *Корниенко С.Г.* Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 67–73.
9. *Коршаков А.А., Шаммазов А.М.* Основы нефтегазового дела. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. 544 с.
10. *Макриденко Л.А., Боярчук К.А., Милосердова Л.В., Малушина Н.И.* Информативность космических изображений для нефтегазогеологического дешифрирования // Вопросы электромеханики. 2008. Т. 105. С. 63–81.
11. Методические рекомендации по применению аэрокосмических методов для диагностики трубопроводных геотехнических систем и мониторинга окружающей среды. М.: ИРЦ Газпром, 1995. 60 с.
12. *Мячина К.В., Дубровская С.А.* Анализ динамики природно-техногенных комплексов нефтяного месторождения в Оренбургской области на основе использования неконтролируемой классификации космоснимков // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2013. № 2. С. 1–9.
13. *Трофимов Д.М.* Эволюция космических методов, результаты их использования в нефтегазопроисловых работах за период 1987–2007 гг. и потенциальные возможности в будущем // Геоматика. 2009. № 1. С. 7–16.
14. *Шарикалов А.Г., Якутин М.В.* Анализ состояния таежных экосистем с использованием методики автоматизированного дешифрирования // **Известия Алтайского государственного университета.** 2014. № 3 (83). Т. 1 С. 123–127.
15. *Шарикалов А.Г., Якутин М.В.* Геоэкологический анализ состояния антропогенных экосистем // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2011. Вып. 3. № 16. С. 95–100.
16. *Kumpula T., Forbes B.C., Stammler F.* Remote sensing and local knowledge of hydrocarbon exploitation: the case of Bovanenkovo, Yamal Peninsula, West Siberia, Russia // Arctic. 2010. V. 63, No 2. P. 165–178.
17. *Yu Q., Epstein H.E., Engstrom R., Shiklomanov N., Streletskiy D.* Land cover and land use changes in the oil and gas regions of Northwestern Siberia under changing climatic conditions // Environmental Research Letters. 2015. V. 10. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/12/124020>

REFERENCES

1. *Abrosimov A.V., Belenov A.V., Bragin E.A.* Space control of subsurface resources and nature management *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*. 2011. No 12. P. 38–42 (in Russian).
2. *Aerospace monitoring of oil and gas facilities* edited by V.G. Bondur. M.: Nauchnyy mir, 2012. 558 p. (in Russian).
3. *Elsakov V.V.* Satellite imagery in the ecological monitoring of the environmental monitoring of hydrocarbon production regions *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. V. 9, No 5. P. 133–139 (in Russian).
4. *Elsakov V.V., Shchanov V.M.* Remote monitoring of the disturbances of the vegetation covers, occurring at different times in the areas of production and transportation of oil *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2004. No 1. P. 152–155 (in Russian).
5. *Kargashin P.E., Karpachevskiy A.M.* Automatizing the interpretation of mechanical disturbances of territories in the forest-tundra zone *Innovatsionnaya nauka*. 2015. No 12. P. 263–268 (in Russian).
6. *Kargashin P.E., Novakovskiy B.A., Karpachevskiy A.M., Kargashina M.A.* Comparative analysis of the methods of automated processing of Landsat images for the interpretation of gas fields in the forest-tundra zone *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos"emka*. 2016. V. 60, No 5. P. 100–104 (in Russian).
7. *Kopylov V.N., Kochergin G.A., Polishchuk Yu.M., Khamedov V.A.* Using Earth remote sensing data for the solution of regional problems of rational nature management. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2009. V. 1, No 6. P. 33–41.
8. *Kornienko S.G.* Assessing the transformation of natural landscapes in the Taz peninsula, using satellite imagery data *Geografiya i prirodnye resursy*. 2011. No 1. P. 67–73 (in Russian).
9. *Korshak A.A., Shammazov A.M.* Fundamentals of Oil and Gas Engineering. Ufa: OOO "Dizayn PoligrafServis", 2001. 544 p. (in Russian).
10. *Makridenko L.A., Boyarchuk K.A., Miloserdova L.V., Malushina N.I.* The informativity of space images for oil and gas geological interpretation *Voprosy elektromekhaniki*. 2008. V. 105. P. 63–81 (in Russian).
11. Methodological recommendations on the application of remote sensing for diagnostics of pipeline geotechnical systems, and for environmental monitoring. M.: IRTs Gazprom, 1995. 60 p. (in Russian).
12. *Myachina K.V., Dubrovskaya S.A.* Analyzing the dynamics of natural-technogenic complexes in an oil field in the Orenburg Region, using an unsupervised classification of satellite images. *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2013. No 2. P. 1–9 (in Russian).
13. *Trofimov D.M.* Evolution of satellite methods, results of their application for oil and gas exploration in 1987–2007, and their potentialities in the future *Geomatika*. 2009. No 1. S. 7–16 (in Russian).
14. *Sharikalov A.G., Yakutin M.V.* Analyzing the state of taiga ecosystems, applying the automated image interpretation method *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014. No 3–1 (83). P. 123–127 (in Russian).
15. *Sharikalov A.G., Yakutin M.V.* Geoecological analysis of the state of anthropogenic ecosystems. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologiy)*. 2011. V. 3, No 16. P. 95–100 (in Russian).
16. *Kumpula T., Forbes B.C., Stammler F.* Remote sensing and local knowledge of hydrocarbon exploitation: the case of Bovanenkovo, Yamal Peninsula, West Siberia, Russia Arctic. 2010. V. 63, No 2. P. 165–178.
17. *Yu Q., Epstein H.E., Engstrom R., Shiklomanov N., Streletskiy D.* Land cover and land use changes in the oil and gas regions of Northwestern Siberia under changing climatic conditions *Environmental Research Letters*. 2015. V. 10. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/12/124020>

Корец М.А.^{1,2}, Скудин В.М.³

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ ВЫДЕЛОВ ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Традиционно картографирование лесотаксационных выделов осуществляется методом ручного контурного дешифрирования спектрозональной аэрофотосъемки. Характеристики выдела присваиваются инженером-таксатором по материалам полевых обследований. Очевидно, что такой ручной подход достаточно трудоемок и субъективен. Широкая доступность в последнее время космической съемки высокого пространственного и спектрального разрешений, цифровых моделей рельефа и программного обеспечения для их тематической обработки позволяет реализовать автоматизированную объектно-ориентированную методику контурного дешифрирования выделов.

Разработка и тестирование предлагаемой методики осуществлялось в процессе лесоустроительных работ, выполняемых для территорий ряда тестовых территорий (заповедников «Кузнецкий Алатау», «Саяно-Шушенский» и арендного участка «Карат»), общей площадью более 800 тыс. га и расположенных в районах Центральной и Южной Сибири. Обработка данных осуществлялась с использованием программных пакетов TrimbleeCognition 8, Scanex Image Processor (Thematic Pro) и ESRI ArcGIS 10.

Картографирование лесотаксационных характеристик осуществлялось на основе мультиспектральной спутниковой съемки (ДДЗ-композигов): Rapideye (5 спектральных каналов, пространственное разрешение – 5 м) и WorldView-2 (4 спектральных канала R-G-B-NIR с пространственным разрешением 1,8 м, приведенное к панхроматическому каналу 0,5 м). В качестве дополнительной информации использовались векторные карты предыдущего лесоустройства с границами лесотаксационных выделов и кварталов, а также материалы полевых работ 2013–2016 гг.

Для оценки и картографирования лесорастительных условий по топографическим характеристикам была использована растровая цифровая модель рельефа (ЦМР) местности ASTER GDEM2 с пространственным разрешением 20 м в пикселе. На основе ЦМР были рассчитаны двухслойные растровые изображения (ЦМР-композигов): $\sin(a)$ и $\cos(a)$, где a – величина угла солнечной экспозиции пикселя.

Многоканальные ДДЗ- и ЦМР-композигов были подвергнуты двухуровневой автоматической сегментации с заданными уровнями пространственной детализации. Полученные векторные ДДЗ- и ЦМР-сегменты объединялись в единый слой базовых выделов, которые затем классифицировались методом максимального правдоподобия с использованием обучающих выборок эталонных пробных площадей. Окончательное таксационное описание выделов генерализованного уровня формировалось на основе комбинаций описаний выделов детального уровня. На завершающем этапе генерализованные выделы подвергались

¹ Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, 660036, Красноярск, Россия, e-mail: mik@ksc.krasn.ru

² Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, 660041, Красноярск, Россия

³ Филиал ФГБУ «Рослесинфорг» «Востсиблеспроект», ул. Крупской, д. 42, 660062, Красноярск, Россия, e-mail: lespravda@gmail.com

пространственной фильтрации, сглаживанию, увязке с границами кварталов и нумерации в соответствии с требованиями и нормативами лесоустроительных работ.

Предлагаемый автоматизированный подход по сравнению с традиционным позволяет значительно повысить производительность работ при контурном дешифрировании лесотаксационных выделов, снизить влияние субъективного фактора при формировании геометрии и характеристик выделов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоматизированное дешифрирование выделов, ГИС, ДЗ, ЦМР.

Mikhail A. Korets^{1, 2}, Viktor M. Skudin³

AUTOMATED APPROACH FOR MAPPING OF FOREST INVENTORY POLYGONS ON THE BASE OF SPACE IMAGERY AND DIGITAL ELEVATION MODEL

ABSTRACT

Conventionally forest inventory polygons mapping procedure is done manually by an aerial red-green-near infrared airborne imagery analysis. A forest inventory expert with help of the selective field plot data assigns forest stand attributes to polygons. This manual approach is time-consuming and highly subjective. The current availability of multispectral satellite imagery, digital elevation models of fine resolution and modern software allows implementing of the atomized and object based approach of forest inventory polygons mapping.

We elaborate and test the new approach in the framework of forest inventory tasks for a number of forest management areas ("Kuznetsk Alatau" reserve, "Sayano-Shushenskaya" reserve and forest lease area "Karat") with total area more than 800 000 ha and location in central and southern Siberia. The Trimble eCognition Developer 8, Scanex Image Processor (Thematic Pro) and ESRI ArcGIS 10 software were used.

We used multiband satellite imagery (RS-composites) of Rapideye (5 spectral bands, 5 m resolution) and WorldView-2 (4 spectral bands R-G-B-NIR with spatial resolution of 1.8 m and fused to panchromatic band resolution of 0.5 m) as main data source for forest attributes mapping. As an additional reference data, we used old achieved forest inventory maps of forest inventory polygons and blocks boundaries, as well as recent groundtruth field data of 2013–2016.

We applied the 20m-resolution ASTER GDEM 2 raster digital elevation model to estimate and map the forest growing conditions. A two-layered images (DEM-composites) were calculated with layers of $\sin(a)$ and $\cos(a)$, where a – is an aspect angle of each pixel.

Both RS- and DEM-composites were automatically segmented for two assigned levels of spatial heterogeneity. Then we combined RS- and DEM-based segments into layer of initial forest inventory polygons and classified them with help of the maximum likelihood method, based on training samples of reference field sites. The resulting attributes tables of generalized inventory polygons were compiled as a combination of polygon attributes of initial detailed level. Finally, the output inventory polygons were spatially filtered, smoothed, snapped to the block boundaries and renumber according to the forest inventory regulations.

¹ Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok str., 50/28, 660036, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: mik@ksc.krasn.ru

² Siberian Federal University, Svobodnyy str., 79, 660041, Krasnoyarsk, Russia

³ "ROSLESINFORG" "Vostsibleproekt", Krupskaya str., 42, 660062, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: lespravda@gmail.com

This automated method takes less time and reduces the human factor influence to compare it with traditional one. It may be rapidly repeated and adjusted to other test sites. Moreover, produced inventory polygons geometry and attributes meet Russia's traditional forest inventory requirements.

KEYWORDS: forest inventory polygons mapping, GIS, RS, DEM.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с инструкцией проведения лесоустройства, лесотаксационный выдел является базовым элементом лесоустройства и определяется как относительно однородный участок леса по породному составу и лесорастительным условиям, включая преобладающую крутизну и экспозицию склона [Минаева, 1995].

Традиционно картографирование выделов осуществляется методом ручного контурного дешифрирования спектрально-аэрофотосъемки. Характеристики выдела присваиваются инженером-таксатором по материалам полевых обследований. Очевидно, что такой «ручной» подход достаточно трудоемок и субъективен, хотя он активно используется и дает хорошие результаты при условии достаточного опыта и ответственности таксатора-дешифровщика [Корец и др., 2007].

На сегодняшний день мультиспектральная спутниковая съемка высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (5–0,5 м) приближается к разрешению цифровой (или оцифрованной) аэрофотосъемки (0,3–0,1 м). В распоряжении российских пользователей данных дистанционного зондирования (ДДЗ) сейчас находится неплохой выбор зарубежных и отечественных спутниковых систем пригодных для тематического дешифрирования и картографирования параметров растительности. Например, Rapideye (5 спектральных каналов, Ortho Products, Level 3A, 5 м пикс.); Worldview-2 (8 спектральных каналов – 1,84 м пикс. и панхроматическим – 0,46 м пикс.); КАНОПУС-В (4 спектральных канала, 2,1 м пикс.); РЕСУРС-П (4 спектральных канала, 0,7 м пикс.).

В открытом доступе (в сети Интернет) сейчас также находятся цифровые растровые модели рельефа местности (ЦМР) различного пространственного разрешения (от 100 до 20 м пикс.): GMTED2010 (100 м пикс.), SRTM (30 м пикс.), ASTER GLOBAL DEM2 (20 м пикс.). Наличие достаточно детальных данных ЦМР позволяет не только выполнять операции ортонормирования съемки ДДЗ при геометрической и радиометрической коррекции, но также использовать прямые и производные параметры рельефа (высоту, крутизну, экспозицию, кривизну, степень расчлененности и др.) для выделения относительно однородных ландшафтных элементов, определяющих типы лесорастительных условий.

Таким образом, существует возможность учесть при автоматизированной сегментации и классификации как спектральные признаки данных ДДЗ, так и типы лесорастительных условий на основе ЦМР.

Методы объектно-ориентированной сегментации реализованы во многих современных программных пакетах обработки ДДЗ, таких как Scanex Image Processor, TrimbleeCognition, ENVI и др.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для автоматизации процесса классификации и картографирования растительного покрова требуется использование объективных количественных критериев. Эта проблема успешно решается при создании классификации растительного покрова в рамках географо-генетического подхода [Колесников, 1956]. Изучаемая территория дифференцируется на участки, однородные по топографическому положению и сочетанию элементов или

форм мезорельефа, и, следовательно, по экологическим режимам, создающим определенный лесорастительный эффект. Генетический принцип классификации проявляется в том, что все насаждения в пределах относительно однородной по топологическому положению территории объединяются общностью происхождения, т. е. рассматриваются как возрастные стадии характерного для этих условий коренного насаждения. Коренные и производные типы насаждений группируются в восстановительный ряд растительности – тип леса, т. е. ряд генетически связанных и последовательно сменяющихся насаждений, которые развиваются в пределах определенного типа лесорастительных условий [Колесников, 1956; Мкртчян, 2006].

Процесс дешифрирования космических изображений базируется на распространенной схеме, включающей их предварительную обработку, сегментацию, классификацию и интерпретацию, анализ точности классифицированных изображений [Richards, 2005].

Наряду с классическим (попиксельным) подходом для классификации ДДЗ в нашей работе используется объектно-ориентированный подход. Основным отличием данного подхода является использование в качестве минимальной операционно-территориальной единицы однородных областей (сегментов или пространственных кластеров), образованных пикселями исходного изображения. При этом процесс формирования сегментов (сегментация) является управляемым. То есть оператор может управлять размером и формой создаваемых сегментов, что в свою очередь позволяет управлять детальностью (степенью генерализации) итоговой тематической карты. Применение объектно-ориентированного подхода хорошо себя зарекомендовало при автоматизированном дешифрировании данных высокого пространственного разрешения [Vock et al., 2005].

Разработка и совершенствование предлагаемой методики осуществлялись в процессе работ, выполняемых по второму разряду лесоустройства для территорий заповедников «Саяно-Шушенский» (площадь ~390 000 га, рельеф горный), «Кузнецкий Алатау» (площадь ~400 000 га, рельеф горный) и на арендном участке «Карат» (площадь ~42 000 га, рельеф равнинный), расположенных в районах Центральной и Южной Сибири (рис. 1).

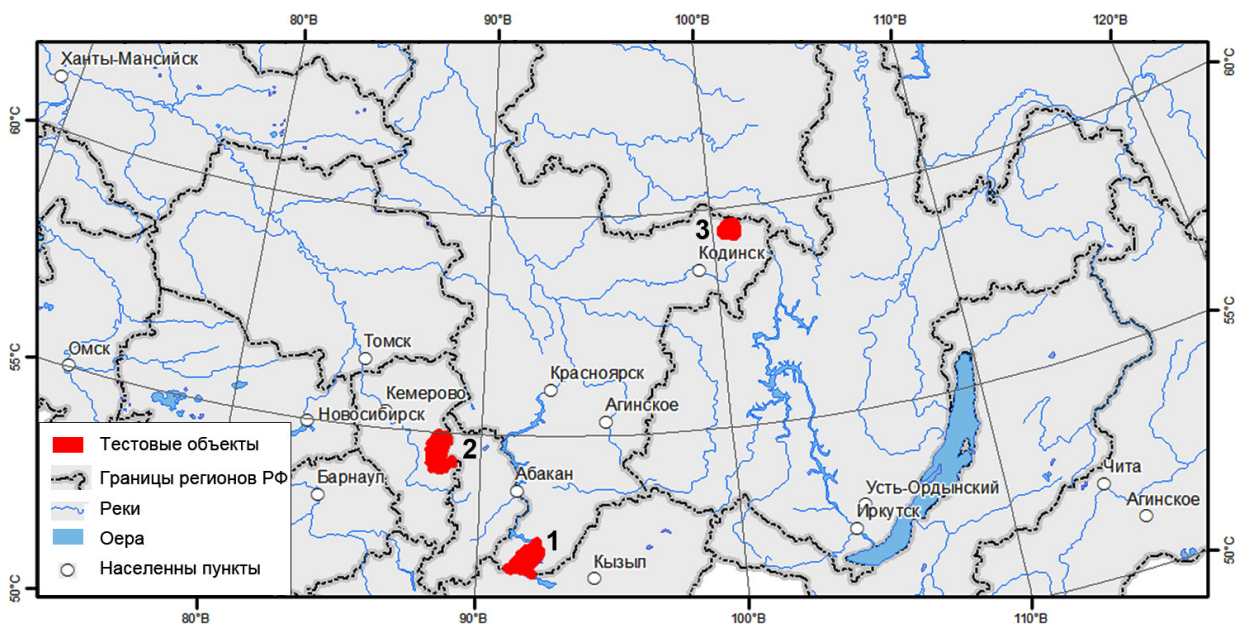


Рис. 1. Расположение тестовых объектов

(1 – заповедник «Саяно-Шушенский», 2 – заповедник «Кузнецкий Алатау», 3 – арендный участок «Карат»)

Fig. 1. Test areas location

(1 – reservation "Sayano-Shushenskiy", 2 – reservation "Kuznetskiy Alatau", 3 – forest lease area "Karat")

Исходными материалами для реализации методики служили: мультиспектральная спутниковая съемка Rapideye (5 спектральных каналов, Ortho Products, Level 3A, пространственное разрешение – 5 м пикс.); мультиспектральная спутниковая съемка WorldView-2 (Ortho-Ready Standard: 4 спектральных канала R-G-B-NIR, 1,8 м пикс., приведенных к 0,5 м пикс.); цифровая растровая модель рельефа местности ASTER GDEM2 – [пространственное разрешение – 20 м/пикс., <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>]; цифровые векторные карты предыдущего лесоустройства, включающие квартальную и выделную сети, а также элементы топографической основы (дороги и реки); материалы современных полевых обследований (описание пробных площадей выборочной таксации).

Обработка данных осуществлялась с использованием программных пакетов Scanex Image Processor 4,2 (Thematic Pro), Trimble eCognition 8 и ESRI ArcGIS 10.

Некоторые элементы разрабатываемой методики были ранее опубликованы в работах [Корец и др., 2007; Корец, 2014; Korets et al., 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные элементы предлагаемой методики представлены в блок-схеме (рис. 2).

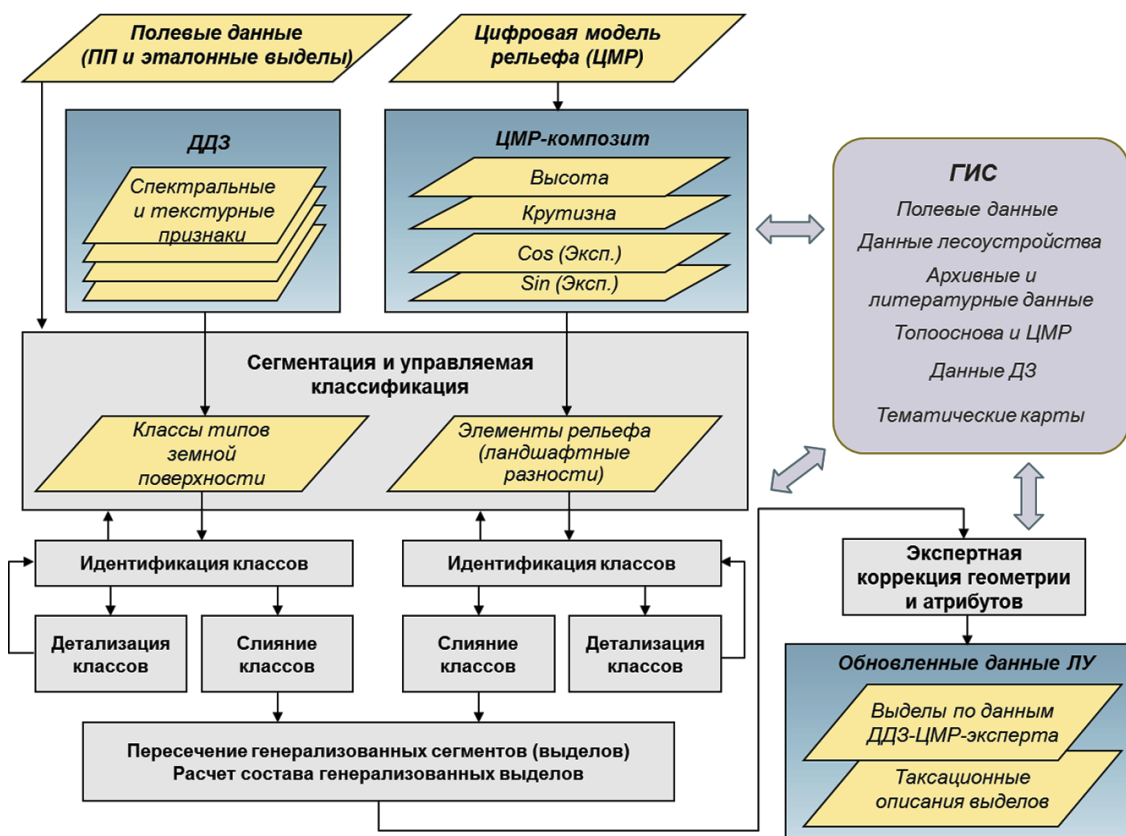


Рис. 2. Блок-схема методики автоматизированного картографирования лесотаксационных выделов

Fig. 2. The block diagram of the atomized approach for forest inventory polygons mapping

1. Подготовка исходных данных

Исходными данными для реализации методики являются: мультиспектральные данные ДЗ, цифровая растровая модель рельефа (ЦМР), полевые опорные таксационные характеристики насаждений (новые полевые пробные площади, эталонные выделы прошлого лесоустройства).

1.1. Подготовка данных ДДЗ

Учитывая современные требования к пространственной точности, как правило, необходима дополнительная геометрическая коррекция полученных данных ДДЗ с использованием опорных точек привязки и ортотрансформации на основе ЦМР.

Для повышения точности автоматизированной оценки характеристик растительности можно использовать дополнительные производные от спектральных признаки: зональные отношения (вегетационные индексы) и характеристики пространственной изменчивости (текстура и форма).

1.2. Подготовка данных ЦМР

На основе исходной высоты по ЦМР (ASTER GDEM) рассчитываются дополнительные растровые слои крутизны и экспозиции склонов ($a, ^\circ$), а также двухслойное изображение: $\sin(a)$, $\cos(a)$, где a – величина угла экспозиции пикселя, измеряемая в градусах относительно направления на север (рис. 3).

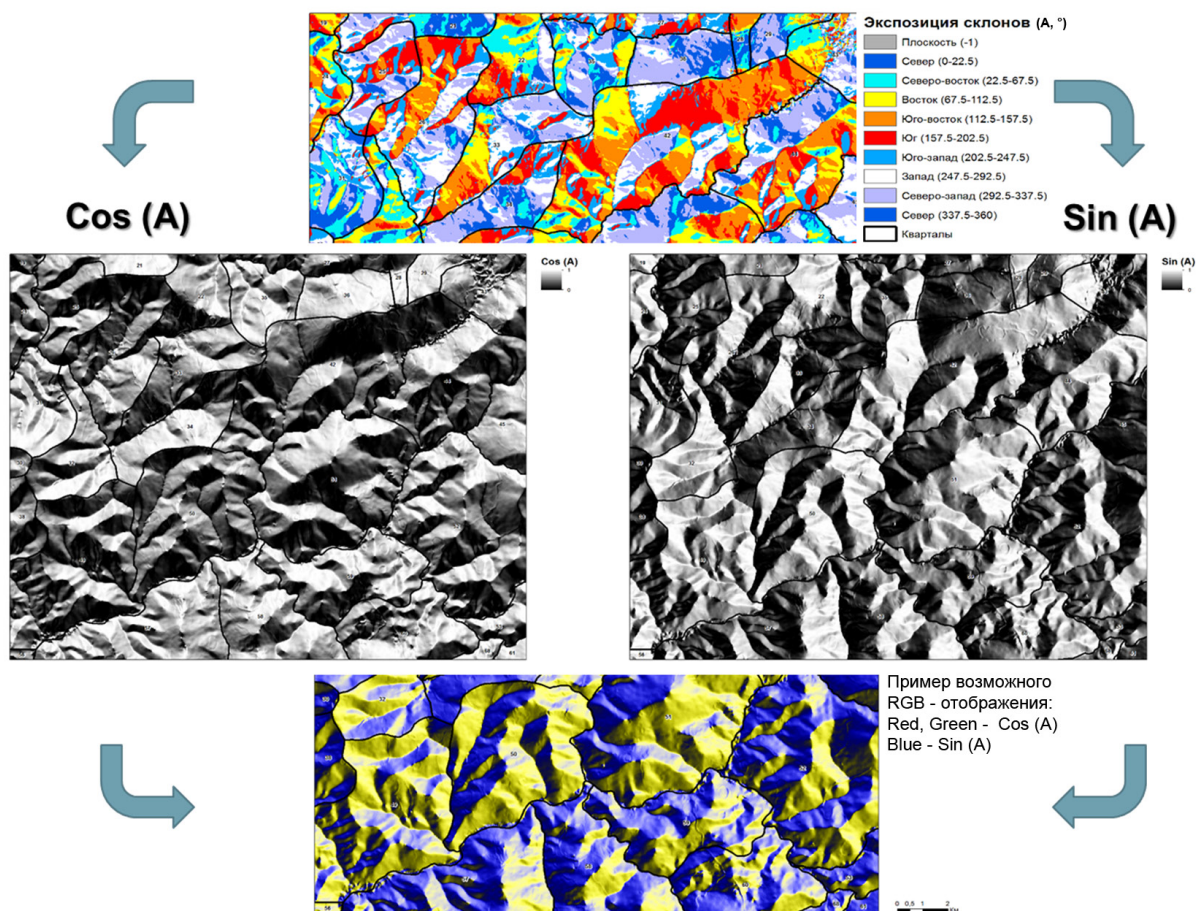


Рис. 3. Формирование ЦМР-композиата
 Fig. 3. The building of the DEM-composite

1.3. Подготовка эталонных данных

Нами предложен метод формирования эталонных выборок на базе совместного анализа лесоустроительных выделов прошлого лесоустройства и спутникового изображения современной ситуации.

С целью повышения статистической достоверности связи дистанционных оптических признаков выдела (сигнатура выдела) с дискретными характеристиками из лесотаксационной базы данных необходимо для эталонной выборки отобрать выдела, наиболее одно-

родные по пространственной структуре. Карты уровня однородности выделов (дисперсии признаков сигнатур выделов), совмещенные с композитным изображением спутниковой сцены, потенциально позволяют сделать это. Для эталонных выборок отбираются только относительно однородные выделы с заданным уровнем величины среднеквадратичного отклонения яркости. Эталонные выделы группируются по принадлежности к информационным классам, представляющих сочетания основных характеристик насаждений (тип леса, породный состав, полнота, возраст и запас преобладающей породы).

2. Сегментация изображений ДДЗ и ЦМР

Сегментация – это процесс формирования новых областей (сегментов) за счет слияния смежных областей (сегментов), состоящих из пикселей исходного изображения, объединенных с использованием одной или нескольких характеристик. В качестве характеристик используются спектральные и текстурные признаки изображений.

В первую очередь сливаются те смежные сегменты, для которых метрика несходства (неоднородность результата слияния, представленная численным значением используемой характеристики) минимальна. Основной характеристикой сегмента при многоканальной сегментации, используемой при слиянии сегментов, является гетерогенность или неоднородность сегмента (ScanEx Image Processor, модуль «Тематик Про»).

2.1. Сегментация многоканальных изображений ДДЗ

На этом этапе многоканальные изображения ДДЗ-компози́ты (спектральные и текстурные слои) подвергаются двухуровневой автоматической сегментации (рис. 4).

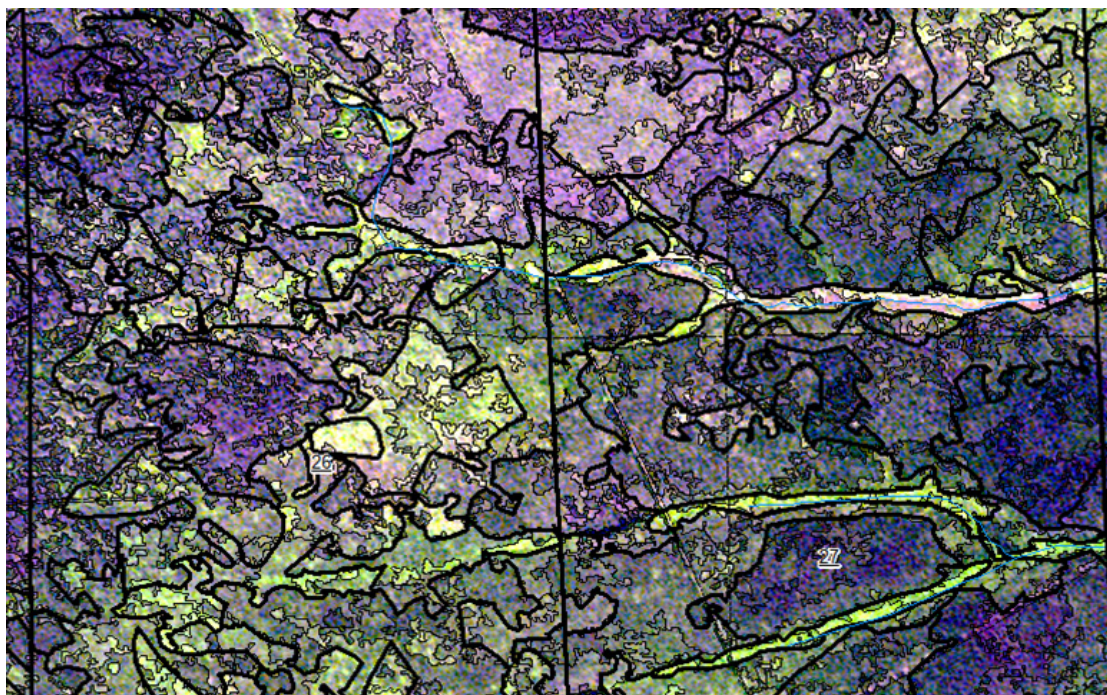


Рис. 4. Фрагмент многоканального спутникового изображения (RapidEye, 5 м) с наложенными сегментами: детальный уровень (тонкие линии) и генерализованный уровень (жирные линии)

Fig. 4. The fragment of Rapideye satellite image overlaid by polygons of segments: detailed level (thin lines), generalized level (bold lines)

При этом первый (детальный) уровень детализации (размера) сегментов определяется минимальной допустимой площадью однородного участка насаждения, выделяемого на данном исходном изображении. Площадь таких сегментов зависит от разрешения исходных изображений ДДЗ и может колебаться от 0,1 до 1 га. Второй генерализованный уровень

сегментации определяется минимальной, средней и максимальной площадью выделов для заданного разряда лесоустройства. Полученные сегменты генерализованного уровня включают в себя сегменты детального уровня, что необходимо в дальнейшем для расчета породного состава результирующих выделов.

2.2. Сегментация ЦМР-композиита

На этом этапе выполняется одноуровневая сегментация многоканальных изображений ЦМР-композиита (высота, крутизна, \sin (эксп.), \cos (эксп.)). Размер сегментов зависит от исходного разрешения используемой ЦМР и заданной минимальной площади выделов при заданном разряде работ (рис. 5). Для каждого сегмента рассчитывается среднее значение вышеуказанных характеристик рельефа для последующей классификации. Описанный этап может быть опущен для равнинных территорий и участков со слабо выраженным рельефом.

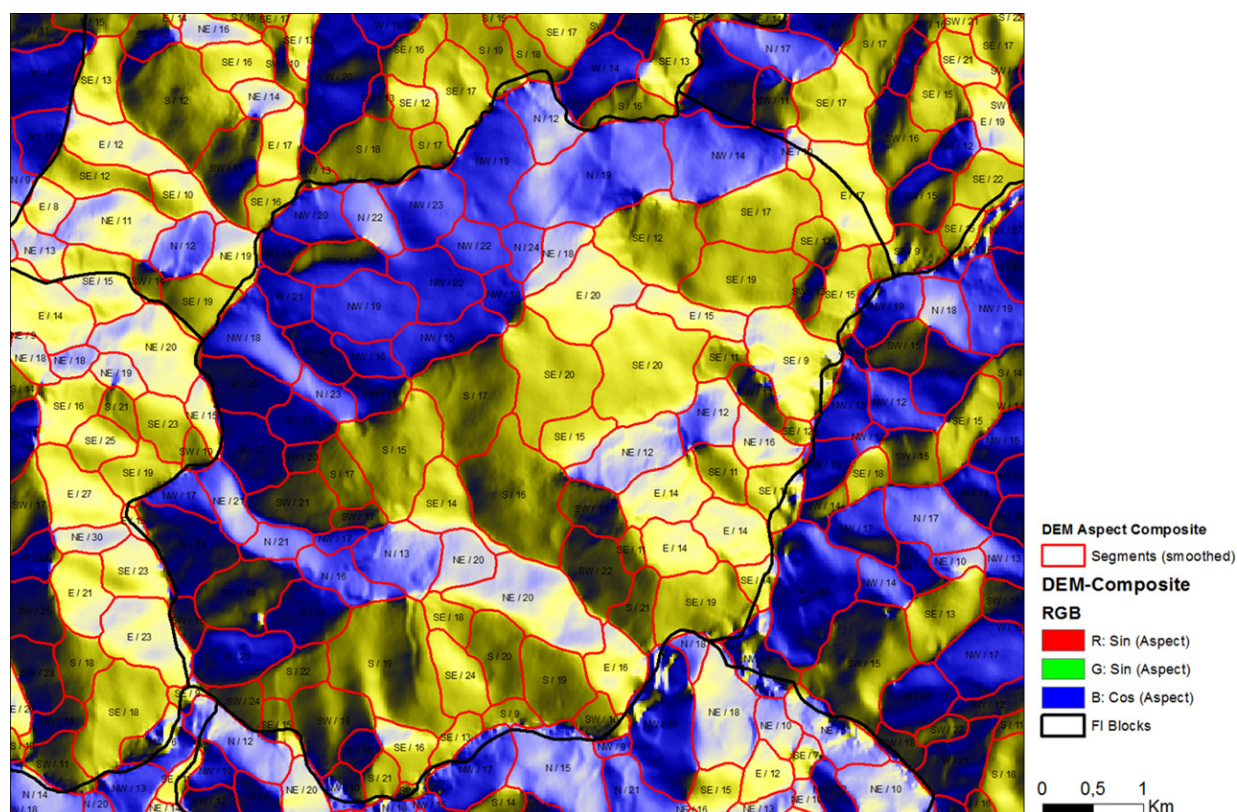


Рис. 5. Пример сегментации ЦМР-композиита

Fig. 5. DEM-composite segmentation example

3. Выбор и идентификация классов для классификации сегментов ДДЗ и ЦМР композитов

Отобранные на предыдущих этапах эталонные выделы совмещаются с полученными сегментами всех уровней, при этом оценивается необходимость и координаты закладки новых пробных площадей внутри сегментов детального уровня в местах отсутствия достоверной эталонной информации из архивных данных. Эталоны выбираются также с учетом транспортной доступности из множества предварительных кандидатов.

Таксационные описания, сформированные в ходе новых полевых работ, анализируются с целью выделения наиболее представленных сочетаний основных таксационных признаков (категория земель, породный состав, тип леса, полнота, группа возраста). В результате формируется набор эталонных сегментов детального уровня, составляющий 1–5 % от общей площади объекта дешифрирования (рис. 6).

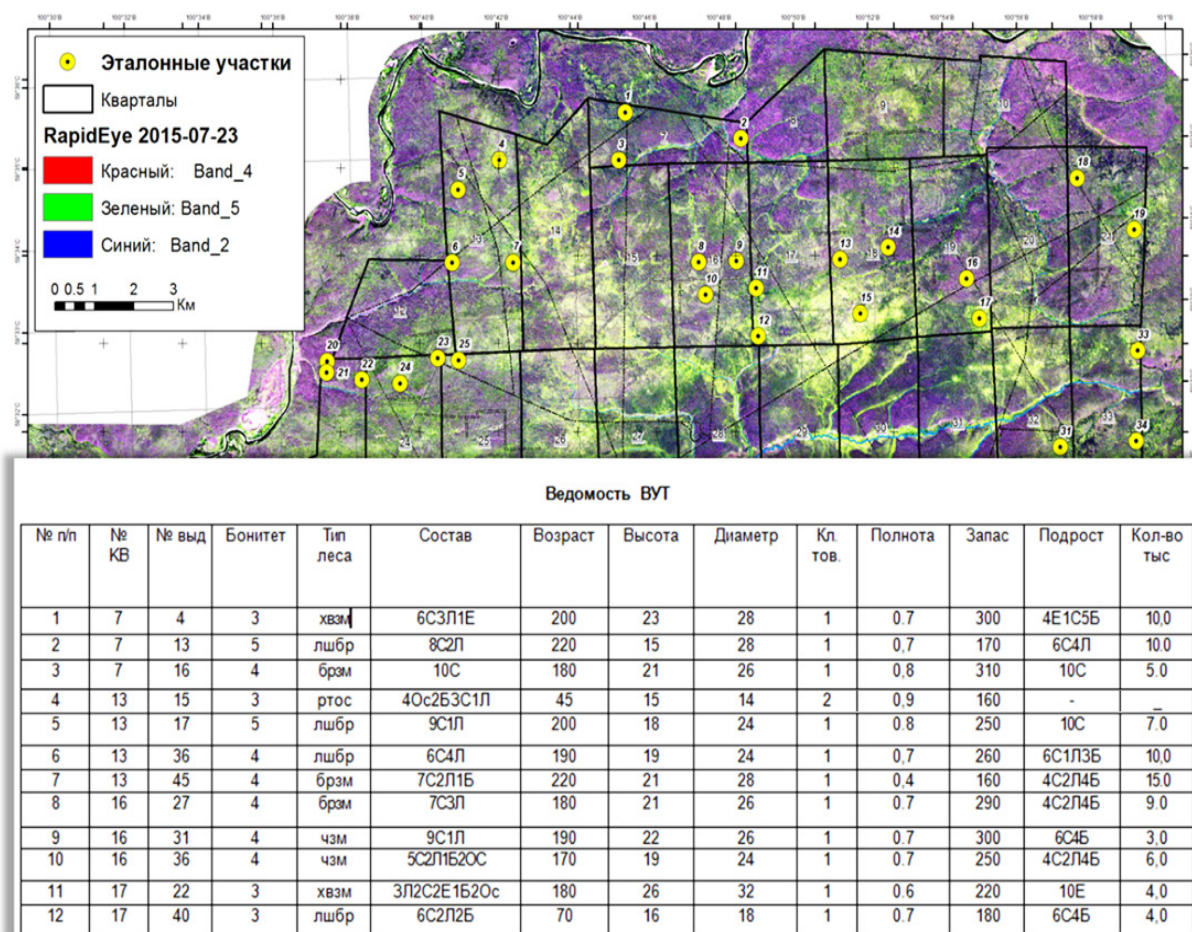


Рис. 6. Формирование набора эталонных данных

Fig. 6. The building of the training sample set

4. Автоматизированная тематическая классификация сегментов

Полученные сегменты рассматриваются как операционно-территориальные единицы, для которых решается задача отнесения к тематическим классам на основании вычисленных для них характеристик (средних значений и дисперсий в каналах признаков ДДЗ и ЦМР). Для этого используется заданная эталонная тематическая информация, позволяющая отнести сегменты обучающей выборки к тому или иному тематическому классу, и математические методы дискриминации, а именно линейный или квадратичный дискриминационный анализ (ScanEx Image Processor, модуль «Тематик Про»).

5. Пересечение и генерализация базовых выделов и классов

На этом этапе полученные в п. 2.1. генерализованные сегменты ДДЗ геометрически пересекаются с сегментами ЦМР и полигонами квартальной сети, при этом их атрибутивные данные объединяются. Также необходимо выполнить фильтрацию и слияние образовавшихся после пересечения мелких полигонов, неудовлетворяющих требованию минимальной площади выдела при заданном разряде работ.

6. Расчет состава генерализованных выделов

Полученные генерализованные выделы накладываются на тематически классифицированные в п. 4. базовые (детальные) сегменты, при этом выполняется автоматизированное формирование таксационного описания генерализованных выделов, в которое классы (категории земель и породы) базовых сегментов заносятся с коэффициентами состава, пропорциональными их площади в составе объединяющего их генерализованного выдела.

7. Экспертная коррекция геометрии и атрибутов

Автоматически сформированные выделы и их описания проверяются экспертом-таксатором, который вносит необходимые правки в машинный вариант. Проверенный и отредактированный картографический слой выделов проходит этапы автоматического сглаживания (упрощения) и увязки границ, а также этап автоматической нумерации (рис. 7).

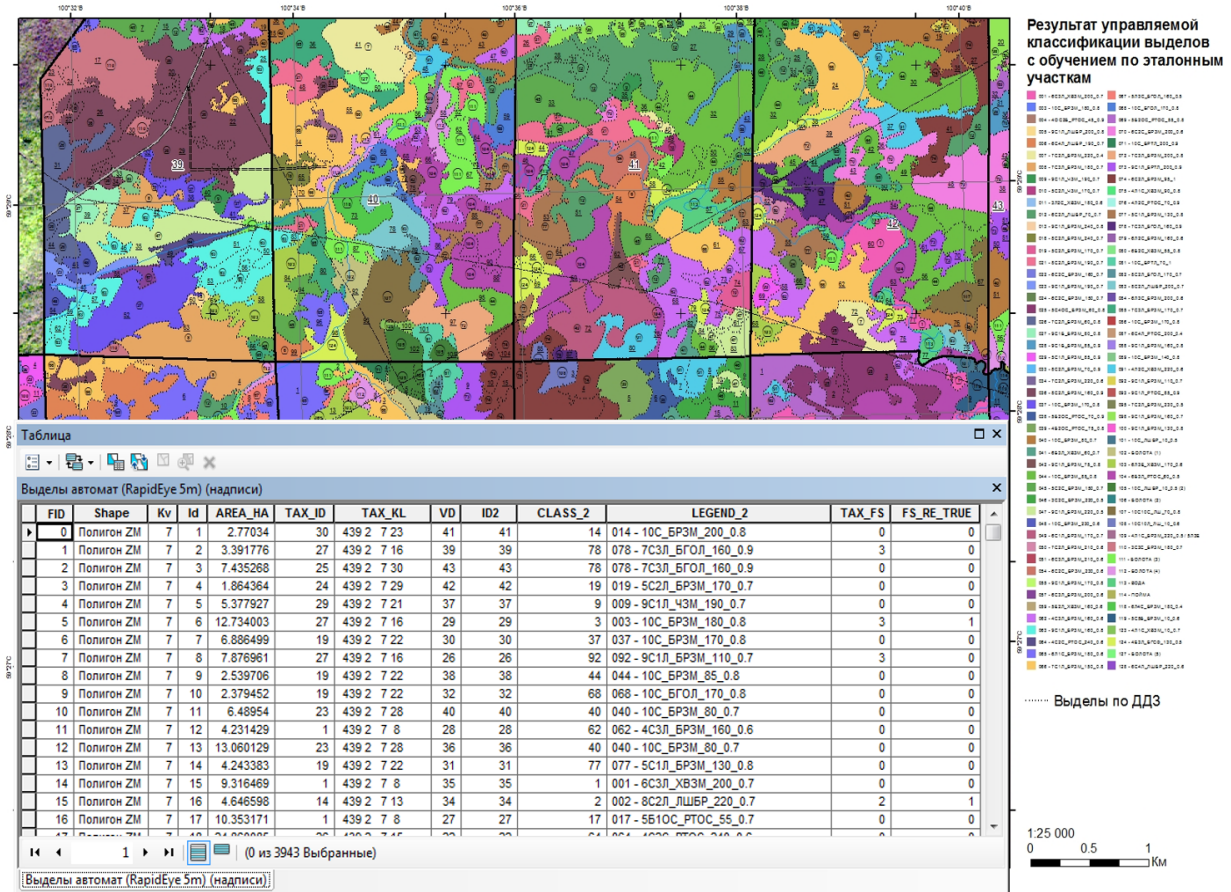


Рис. 7. Пример автоматически сформированных выделов и их описаний
Fig. 7. An example of the automatically generated forest inventory polygons with their attributes

ВЫВОДЫ

Предложенная методика комбинированного анализа данных дистанционного зондирования, цифровой модели рельефа и материалов наземных обследований позволяет в значительной мере автоматизировать процесс формирования лесотаксационных карт и описаний. Расширенный набор дешифровочных признаков, включающий спектральные, текстурные и ландшафтные характеристики территории, позволяет повысить точность автоматического картографирования лесотаксационных выделов в условиях равнинного и горного рельефа местности.

Разработка и апробация элементов методики осуществлялась в рамках лесоустроительных работ, выполняемых на территории крупных тестовых объектов, расположенных в районах Центральной и Южной Сибири.

Предложенная схема интерпретации дистанционных данных позволяет значительно ускорить процесс тематической обработки изображений, а также снизить влияние субъективного фактора на результат.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 18-05-00781 и № 18-05-00235.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, No 18-05-00781 and No 18-05-00235.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников Б.П. Кедровые леса Дальнего Востока. М.; Л: Изд-во АН СССР, 1956. 262 с.
2. Корец М.А., Данилова И.В., Черкашин В.П. Дистанционная индикация структуры лесных территорий // Региональные проблемы экосистемного лесоводства. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 52–68.
3. Корец М.А. Использование объектно-ориентированного подхода для автоматизированного дешифрирования лесотаксационных выделов по материалам космической съемки и цифровой модели рельефа местности // Материалы Междунар. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», 23–36 сентября 2014 г., Красноярск: ИКИТ СФУ, 2014. С. 294–298.
4. Минаева Л.Ю. Инструкция по проведению лесоустройства в лесном фонде России. Ч. 1. Организация лесоустройства. М.: Воениздат, 1995. № 6. 274 с.
5. Мкртчян А.С. Автоматизированное выделение ландшафтных единиц путем классификации рельефа с применением ГИС // Ландшафтное планирование. Общие основания. Методология. Технология: тр. Междунар. школы-конф. М.: Географический факультет МГУ, 2006. С. 203–208.
6. Рыжкова В.А. Восстановительная динамика южнотаежных лесов. // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 146–157.
7. Рыжкова В.А. Закономерности восстановительной динамики подтаежных и горнотаежных лесов // Региональные проблемы экосистемного лесоводства. Красноярск: Изд-во Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 78–90.
8. Bock M., Xofis P., Mitchley J., Rossner G., Wissen M. Object-oriented methods for habitat mapping at multiple scales – Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK // Journal for Nature Conservation. 2005. V. 13. P. 75–89. DOI: 10.1016/j.jnc.2004.12.002.
9. Korets M., Ryzhkova V., Danilova I., Prokushkin A. Vegetation cover mapping based on remote sensing and digital elevation model data, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2016. V. XLI-B8. P. 699–704. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-699-2016.
10. Richards J., Xiuping J. Remote sensing digital image analysis: an introduction. Birkhäuser, Basel, 2005. Switzerland. 439 p.
11. Ryzhkova V., Danilova I. GIS-based classification and mapping of forest site condition and vegetation. BOSQUE, 2012. V. 33(3). P. 293–297.

REFERENCES

1. Bock M., Xofis P., Mitchley J., Rossner G., Wissen M. Object-oriented methods for habitat mapping at multiple scales – Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK. Journal for Nature Conservation. 2005. V. 13. P. 75–89. DOI: 10.1016/j.jnc.2004.12.002.
2. Kolesnikov B.P. Siberian pine forests of the Russian Far East. M.; L.: Nauka, 1956. 261 p. (in Russian).
3. Korets M.A., Danilova I.V., Cherkashin V.P. Remote indication of forest landscape structure, In: Regional Sustainable Forestry Problems. Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk, 2007. P. 52–68 (in Russian).

4. *Korets M.A.* The use of object-based image analysis for mapping forest inventory stands based on satellite imagery and digital elevation model. International conference proceedings "Regional problems of remote sensing of the Earth", 2014. Krasnoyarsk: SFU, 2014. P. 294–298 (in Russian).
5. *Korets M., Ryzhkova V., Danilova I., Prokushkin A.* Vegetation cover mapping based on remote sensing and digital elevation model data, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2016. V. XLI-B8. P. 699–704. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-699-2016.
6. *Minayeva L.U.* Forest inventory regulation of the Russia. V. 1. M.: Voenizdat, 1995. No 6. 274 p. (in Russian).
7. *Mkrtchan A.S.* Atomized mapping of the landscape units on the base of relief classification with help of GIS. International conference proceedings. M.: MGU, 2006. P. 203–208 (in Russian).
8. *Richards J., Xiuping J.* Remote sensing digital image analysis: an introduction. Birkhäuser, Basel, 2005. Switzerland. 439 p.
9. *Ryzhkova V.A.* Southern taiga forest regeneration dynamics. In: Forest Ecosystems of the Yenisei Meridian. Novosibirsk, 2002. P. 146–157 (in Russian).
10. *Ryzhkova V.A.* Regeneration of subtaiga and mountain taiga forests. In: Regional Sustainable Forestry Problems. Sukachev Institute of Forest Publications. Krasnoyarsk, 2007. P. 78–90 (in Russian).
11. *Ryzhkova V., Danilova I.* GIS-based classification and mapping of forest site condition and vegetation. BOSQUE, 2012. V. 33(3). P. 293–297.

Корнеева Н.Ю.¹, Измайлова А.В.²

ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ОЗЕРНОГО ВОДНОГО ПОКРЫТИЯ РЕГИОНОВ НЕДОСТАТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

АННОТАЦИЯ

В рамках проведенных в Институте озераведения РАН работ по оценке водных ресурсов озер Российской Федерации получен массив данных, позволяющий разрабатывать подробную карту озерности Российской Федерации. Анализ показателя озерности территории является наиболее удобным для оценки пространственной неоднородности распределения озерных водных ресурсов. Для регионов, расположенных в пределах зоны водного дефицита, значения коэффициентов озерности в разные сезоны и в разные по водности годы могут отличаться от средних величин, полученных ранее авторами. Проведение анализа изменений озерного покрытия в таких регионах представляется возможным с использованием данных спутниковой съемки за различные сезоны года и периоды водности. Изучение динамики озерных ресурсов регионов недостаточного увлажнения было начато с использования спутниковых снимков Landsat 5 TM уровня обработки Level-1 среднего пространственного разрешения. Анализ сцен за разные периоды водности 2010 г. показал сокращение суммарной площади водного зеркала в пределах пяти тестовых участков, расположенных на юге Тюменской области, в период с мая по август на 20 %. Количество водоемов крупнее 10 га уменьшилось с 60 до 46. На основе рассчитанных величин озерности в периоды различной водности 2010 г. были построены карты-схемы озерного покрытия для территории пробного района. Полученные характеристики временной динамики водной поверхности, а также анализ построенных карт озерности позволяют проводить уточнения результатов оценки водных ресурсов озер Российской Федерации для регионов водного дефицита.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные ресурсы, озерность, спутниковый снимок, карта озерности, геоинформационные системы.

Natalya Yu. Korneenkova³, Anna V. Izmailova⁴

SPATIAL AND TEMPORAL HETEROGENEITY OF WATER SURFACE AREA OF LAKES IN THE REGIONS OF INSUFFICIENT MOISTURE WITH USING THE SATELLITE IMAGES

ABSTRACT

The significant data array has been obtained within the framework of the works carried out at the Institute of Limnology RAS for assessing the water resources of the lakes of the Russian Federation. This array makes it possible to develop a detailed map of lake percentage of the Russian Federation.

¹ ФГБУН Институт озераведения Российской академии наук, ул. Севастьянова, д. 9, 196105, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ntkorn87@gmail.com

² ФГБУН Институт озераведения Российской академии наук, ул. Севастьянова, д. 9, 196105, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ianna64@mail.ru

³ Institute of Limnology Russian Academy of Sciences, Sevastyanova str., 9, 196105, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: ntkorn87@gmail.com

⁴ Institute of Limnology Russian Academy of Sciences, Sevastyanova str., 9, 196105, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: ianna64@mail.ru

An analysis of the change in the lake percentage coefficient is the most convenient for estimating the spatial heterogeneity of the distribution of lake water resources. For regions located within the water deficit zone, the values of the lake percentage in different seasons and in different years may differ from the mean values obtained earlier by the authors. Analysis of changes in lake coverage in such regions is possible using satellite imagery data for different seasons of the year and for different periods of water content. A study of the dynamics of the lake water resources of the insufficient moisture regions was started using images of Landsat 5 TM Level-1. The analysis of scenes for different periods of water content in 2010 showed a 20 % reduction of the total surface water area within the five test sites located in the south of the Tyumen region for the period from May to August. The quantity of reservoirs are larger than 10 hectares has decreased with 60 to 46. Map-schemes of lake percentage for the periods of different water content for the trial territory were constructed on the basis calculation values of lake percentage. The obtained characteristics of the temporal dynamics of the surface water area, as well as the analysis of the maps of lake percentage, allow us to refine the results of the assessment of the water resources of the lakes of the Russian Federation for the regions of water deficiency.

KEYWORDS: water resources, lake percentage, satellite image, map of lake percentage, geoinformation systems.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на огромные объемы озерных вод, для Российской Федерации характерна значительная пространственная неоднородность распределения озерного фонда по территории и его слабая согласованность с центрами размещения населения, а также промышленного и сельскохозяйственного производства.

Для оценки пространственной неоднородности распределения озерных водных ресурсов наиболее удобным является анализ показателя озерности территории, который, в отличие от суммарной водной поверхности, является удельной величиной.

Озерность – отношение суммарной водной поверхности озер и искусственно созданных водоемов к площади рассматриваемой территории. Данная характеристика дает общее представление о площади водного покрытия региона и позволяет получить наглядную информацию о пространственном распределении озер. Кроме того, коэффициент озерности является характеристикой, часто применяемой в гидрологических расчетах. Чем больше его величина, тем сильнее естественная зарегулированность стока, проявляющаяся в уменьшении внутригодовых и межгодовых колебаний уровня и расхода воды в речной сети территории, мутности и минерализации речных и озерных водных масс.

В течение нескольких лет в Институте озероведения Российской академии наук проводилась новая оценка ресурсов озерных вод Российской Федерации. Она выполнялась на основе современных космических снимков с применением единой, специально разработанной методики, основанной на использовании возможностей программы «Google Планета Земля» [Измайлова, 2016]. В ходе оценки производился подробный количественный подсчет водоемов по градациям крупности и измерение площадей их водной поверхности. При этом учитывались как естественные, так и искусственные водоемы (пруды, водохранилища, карьеры и т. д.).

Детальность, с которой в рамках оценки водных ресурсов озер происходило определение площадей водной поверхности РФ и полученный огромный пространственно-распределенный массив точечных характеристик делают возможным составление достаточно подробных карт озерности как для всей территории России, так и для отдельных ее регионов. Однако необходимо иметь в виду, что для водоемов, расположенных в пределах зоны недостаточного и неустойчивого увлажнения, характерна значительная изменчивость площади

зеркала как во внутригодовом, так и в многолетнем разрезе. В связи с этим, карта озерности, построенная по осредненным за начало века данным, для таких регионов требует уточнений, которые возможно произвести с использованием материалов космической съемки за разные периоды водности и различные сезоны года.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой для построения карты озерности РФ явился массив точечных характеристик данного показателя, полученный для различных регионов страны в рамках работ по определению площадей водной поверхности России с использованием программы «Google Планета Земля». Поскольку программа «Google Планета Земля» содержит мозаику снимков за разные сезоны и за разные годы, снятые с ее помощью площади водной поверхности применительно к какой-либо значимой по площади территории принимаются за осредненные. Полученный в рамках работ массив данных содержит более 30 000 значений осредненных за начало XXI в. коэффициентов озерности, равномерно покрывающих всю территорию России.

Для разработки электронной карты озерности Российской Федерации использовались возможности свободной геоинформационной системы с открытым кодом QuantumGIS (QGIS). Практичная рабочая среда системы предоставляет широкие возможности для визуализации больших массивов пространственно-распределенных данных. Также QGIS позволяет параллельно работать со спутниковой информацией.

Для обеспечения хорошей визуализации данных была разработана шкала значений коэффициентов озерности, учитывающая их изменчивость по территории страны. Разграничение озерных районов на карте осуществлялось с учетом данных космических снимков, в отдельных случаях – информации с геоморфологических карт.

Составленная подробная электронная карта озерности (рис. 1) может представлять интерес в качестве средства наглядной визуализации количественных характеристик водной поверхности РФ и ее регионов.

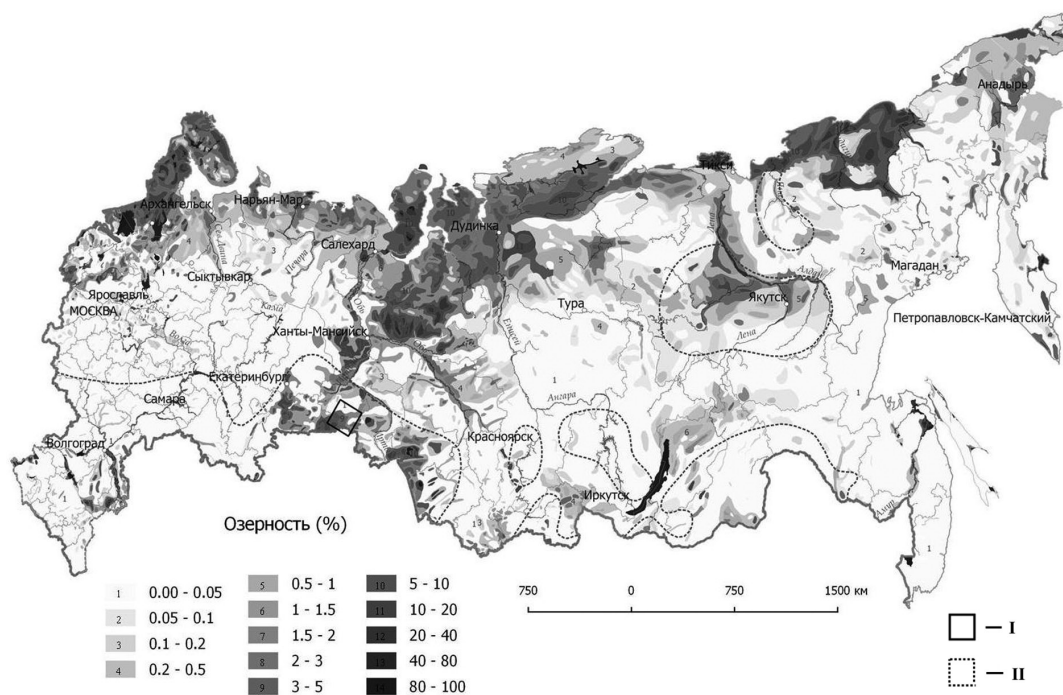


Рис. 1. Озерность территории Российской Федерации:

I – район исследований; II – регионы недостаточного увлажнения [Атлас..., 1974]

Fig. 1. Lake percentage of the Russian Federation:

I – study area; II – regions of insufficient moisture [Atlas..., 1974]

Необходимо отметить, что для северных регионов и для регионов, расположенных в пределах зоны неустойчивого и недостаточного увлажнения, значения коэффициентов озерности в разные сезоны и в разные по водности годы могут отличаться от полученных нами средних величин. Это особенно актуально для южных районов страны, характеризующихся повышенной плотностью населения и наличием водного дефицита. В связи с тем, что большинство регионов, расположенных в пределах зоны неустойчивого и недостаточного увлажнения, характеризуются крайне слабой степенью лимнологической изученности, анализ временной изменчивости озерных водных ресурсов в таких регионах требует разработки специального методического обоснования. При этом дефицит натурных данных может быть восполнен за счет использования спутниковой информации, а именно за счет данных по площадям дешифрируемых озер, снятых со спутниковых снимков в конкретные годы и в конкретный период.

Рассмотрение построенной карты озерного покрытия Российской Федерации (см. рис. 1) свидетельствует о повышенных значениях коэффициента озерности практически для всей территории Западной Сибири, включая ее южную часть, относящуюся к регионам недостаточного увлажнения. Необходимо отметить, что среди всех регионов недостаточного увлажнения, расположенных в пределах России, юг Западной Сибири является одним из наиболее обеспеченных озерными водными ресурсами. Согласно расчетам, проведенным при новой оценке водных ресурсов озер РФ, в южной равнинной части Западной Сибири насчитывается около 15 000 озер площадью более 1 га [Измайлова, Шмакова 2015]. Примерно 10 % водоемов превышают по площади 1 км².

Распределение озер по территории южной части Западной Сибири неравномерное. Наибольшее их количество приходится на Курганскую и Новосибирскую области, много озер в Омской области, на территории Алтайского края, а также в расположенной в пределах зоны недостаточного увлажнения южной части Тюменской области.

Для изучения внутригодовой динамики площадей водоемов юга Западной Сибири были проанализированы снимки TM/Landsat 5 с пространственным разрешением 30 м, полученные посредством сервиса Earth-Explorer [[http:// Earthexplorer.usgs.gov/](http://Earthexplorer.usgs.gov/)]. Обработке были подвергнуты сцены за 9 мая, 20 июля, 29 августа и 1 ноября 2010 г.

На основе анализа спутниковой информации рассчитывались изменения количества и площадей водоемов на каждую дату в пределах пяти тестовых участков размером 14 × 14 км (рис. 2), расположенных на юге Тюменской области в зоне недостаточного увлажнения.

Озера исследуемых участков приурочены к Тоболо-Ишимской лесостепи, представляющей собой плоскую равнину со средними высотами около 100 м [Водно-болотные..., 1998].

При определении площадей озер выполнялось визуальное дешифрирование многозонального изображения с цифрованием контура береговой линии в среде Quantum-GIS. Выделение границы водной поверхности и суши производилось на основе анализа комбинации изображений ближнего инфракрасного, среднего инфракрасного и красного видимого каналов. Использовались многоканальные водные индексы NDWI и MNDWI [Xu, 2006; Курганович, Носкова, 2015]:

$$NDWI = b2 - b4/b2 + b4,$$

где $b2$, $b4$ – интенсивность излучения в спектральных каналах 2 и 4 TM/Landsat

$$MNDWI = b2 - b5/b2 + b5,$$

где $b2$, $b5$ – интенсивность излучения в спектральных каналах 2 и 5 TM/Landsat

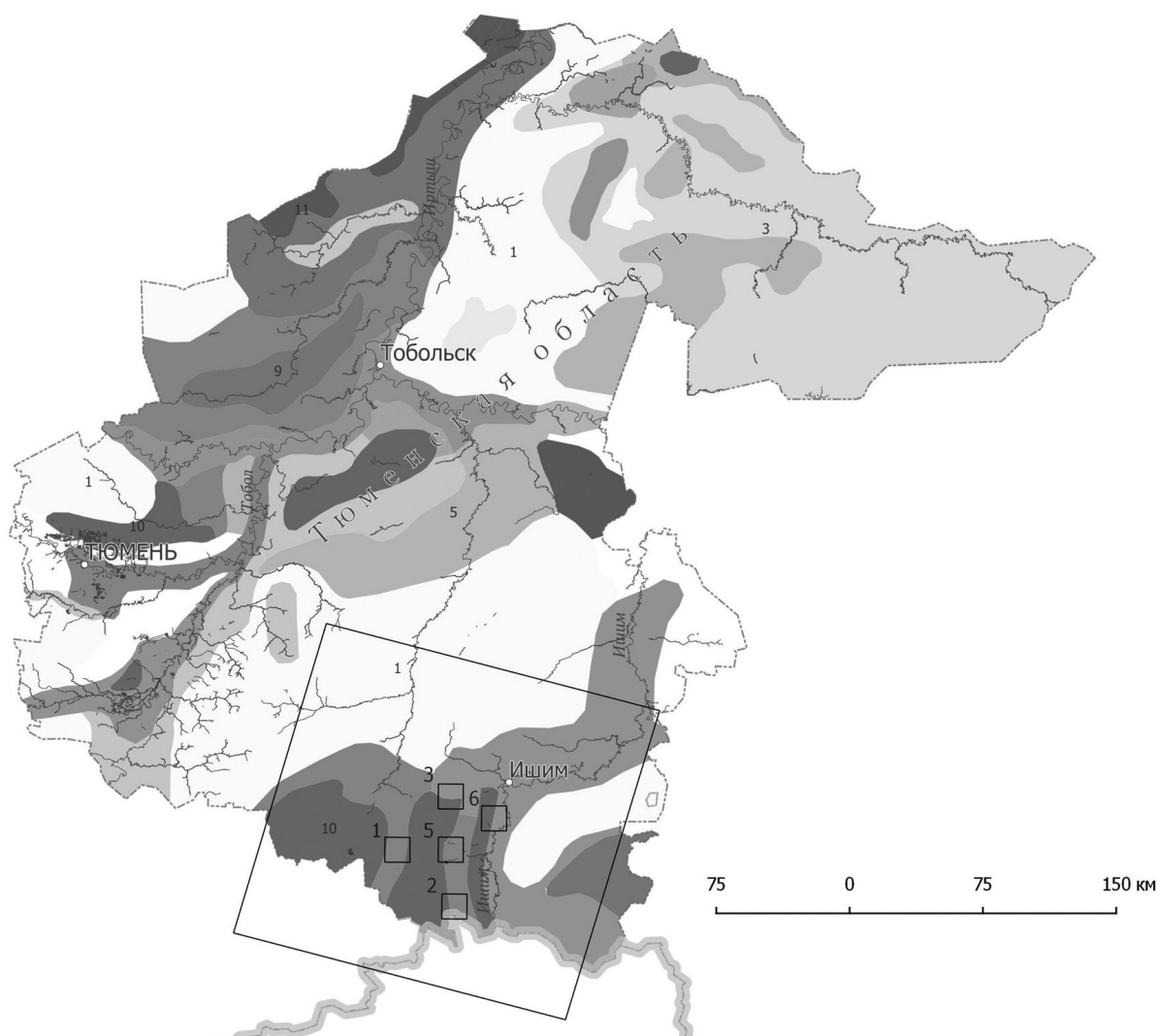


Рис. 2. Озерность Тюменской области и расположение тестовых участков исследований.
Условные обозначения соответствуют рис. 1.

Fig. 2. Lake percentage of Tyumen Region and the location of the study sites.
Symbols correspond to the Fig. 1

Из исследования динамики площадей при итоговых расчетах были исключены озера с площадью зеркала менее 10 га в связи с большой погрешностью определения их морфометрических характеристик на снимках TM/Landsat среднего пространственного разрешения.

На основе полученного материала производилось определение коэффициентов озерности для периодов различной водности в пределах каждого тестового участка. Значения озерности рассчитывались с учетом всех водоемов, подвергавшихся дешифрированию, в том числе менее 10 га.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно проведенной в Институте озероведения РАН оценке, средний коэффициент озерности Российской Федерации, рассчитанный с учетом искусственных водоемов, составляет ~2,3 %, с учетом только естественных водоемов ~1,9 % [Измайлова, 2016].

В различных районах Российской Федерации озерность изменяется от практически нулевых значений до величин, превышающих несколько десятков процентов. В естественных условиях наибольшей озерностью (см. рис. 1) характеризуются северные территории – Кольско-Карельский сегмент Балтийского кристаллического щита (среднее значение 13–6 %) и северо-запад Русской плиты (6 %), где доминируют озерные котловины ледникового происхождения. Повышенная озерность характерна и для морских, моренных и водно-ледниковых равнин севера Сибири (5–4 %) и севера Русской равнины (2,6 %), где преобладающие по количеству термокарстовые водоемы соседствуют с речными, ледниковыми, морскими, суффозионными и тектоническими. Максимальные значения озерности (до 30 % и более) наблюдаются здесь, прежде всего на речных поймах и низких террасах, тогда как для дренированных водораздельных пространств характерны пониженные коэффициенты озерности. Повышенная озерность отмечается практически на всей территории Западной Сибири (3,3 %). Для равнинных регионов, подвергавшихся оледенению, озерность составляет более 4 %, за пределами распространения оледенения она несколько снижается. Однако даже в южной равнинной части Западной Сибири, расположенной в зоне неустойчивого и недостаточного увлажнения, показатель озерности в среднем составляет около 2 %.

Среди всех регионов РФ, относящихся к зоне недостаточного увлажнения, юг Западной Сибири, включая верхнюю часть бассейна Урала, части бассейнов Иртыша и его основных притоков – Ишима и Тобола, бассейн Верхней Оби и бессточные области междуречий Оби и Иртыша, характеризуется наибольшей озерностью. Как уже указывалось выше, характерной чертой зоны недостаточного увлажнения является высокая временная изменчивость водных ресурсов (включая озерные воды) как во внутригодовом, так и в многолетнем разрезе. В этой связи уточнение результатов проведенной в ИНОЗ РАН оценки озерных ресурсов регионов Российской Федерации за счет учета их значительной изменчивости в регионах водного дефицита производилось с использованием материалов космической съемки за разные периоды водности и различные сезоны года. Анализ построенных карт озерности, а также данных оценки озерного фонда проводился на примере территории Тюменской области, частично расположенной в зоне недостаточного увлажнения.

Основываясь на полученных нами данных, можно отметить, что примерно треть территории Тюменской области занимают районы с коэффициентом озерности, не превышающим 0,1 %. Около 15 % площади области характеризуется озерностью от 0,1 до 0,2 %. Коэффициент озерности более 5 % наблюдается на территориях, суммарно составляющих около 8 % площади, в том числе на районы с озерностью от 5 до 10 % приходится 6 % территории, а на районы с коэффициентом более 10 % – 2 % (см. рис. 2).

Проведенный анализ сцен TM/Landsat 5 за различные периоды водности свидетельствует, что на тестовых участках в конце июля 2010 г. отмечается уменьшение суммарной площади озер крупнее 0,1 км² по сравнению с началом мая (рис. 3).

Наибольшее сокращение площади водной поверхности наблюдается на фрагментах № 3 «Долгое» и № 5 «Светлое» (примерно 45 и 35 % соответственно) (рис. 4). Для фрагмента № 2 «Песчаное» отмечено уменьшение площади зеркала озер в июле на 10 %. Самые низкие показатели изменения водной поверхности получены для тестового участка № 6 «Травное» (около 3 %), более 1/2 площади водного зеркала которого приходится на три крупных водоема.

В среднем к концу июля площадь водоемов уменьшается более чем на 15 %. Общее число водоемов крупнее 0,1 км² сокращается с 60 до 46. Разница рассчитанных значений суммарной площади водной поверхности в августе и июле составляет около 4,5 %.

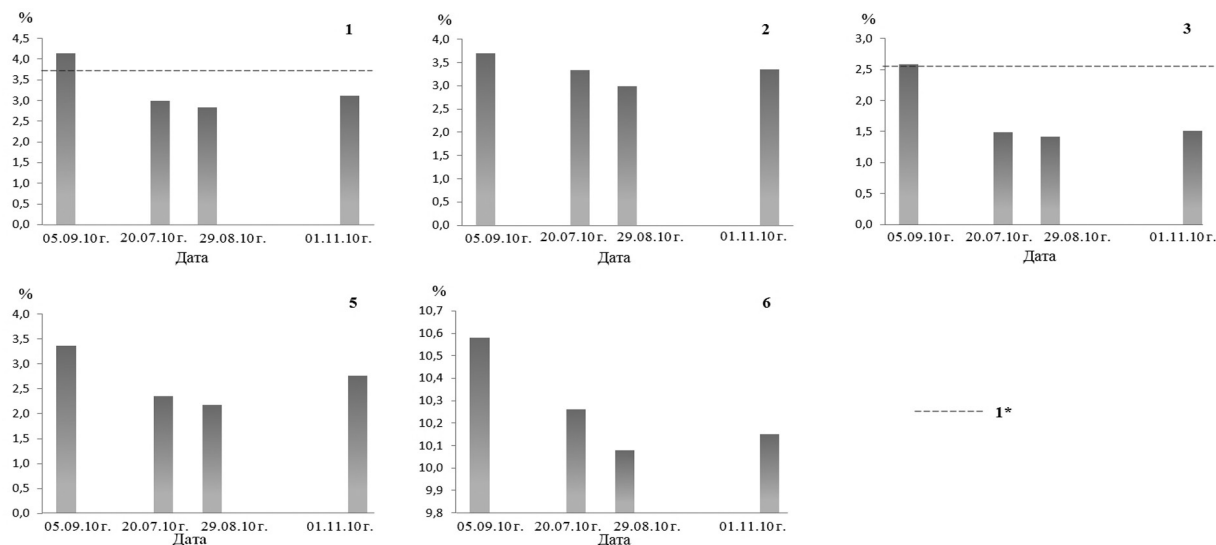


Рис. 3. Изменение суммарной площади водного покрытия для территорий тестовых участков № 1–3, 5, 6 в мае, июле, августе и ноябре 2010 г.

Fig. 3. The total area of water surface variations of the test sites No 1–3, 5, 6 in May, June, August and November 2010

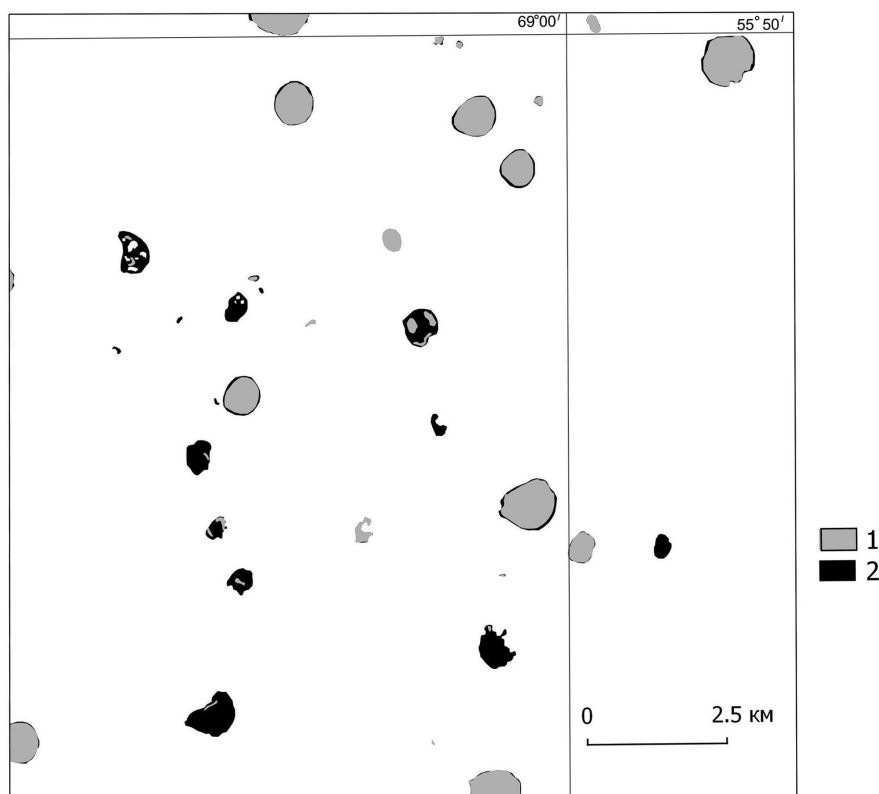


Рис. 4. Изменение площади водной поверхности тестового участка № 5 в 2010 г.: 1 – площадь озер 29 августа 2010 г., 2 – сокращение площади озер в период с мая по август 2010 г.

Fig. 4. Variations of water-surface lake area of test site No 5 in 2010:

1 – water-surface lakes area August 29, 2010, 2 – water-surface lake area reduction from May to August, 2010

В ноябре установлено увеличение площади водного зеркала озер крупнее 10 га примерно на 8 % по отношению к августу.

Полученный материал делает возможным определение показателя озерности для территорий каждого участка для периодов различной водности (рис. 5). Для фрагмента № 1 в мае рассчитанный коэффициент озерности (4,2 %) превышает среднемноголетнюю величину, полученную в ходе проведенной ранее в ИНОЗ РАН оценки (3,23 %). В то же время рассчитанные для периода с середины июля до начала ноября значения несколько ниже (3,1–2,8 %).

Коэффициент озерности тестового участка № 3 в июле, августе и ноябре существенно ниже (1,4–1,5 %), а в мае – соответствует установленному ранее в ИНОЗ РАН показателю (2,6 %).

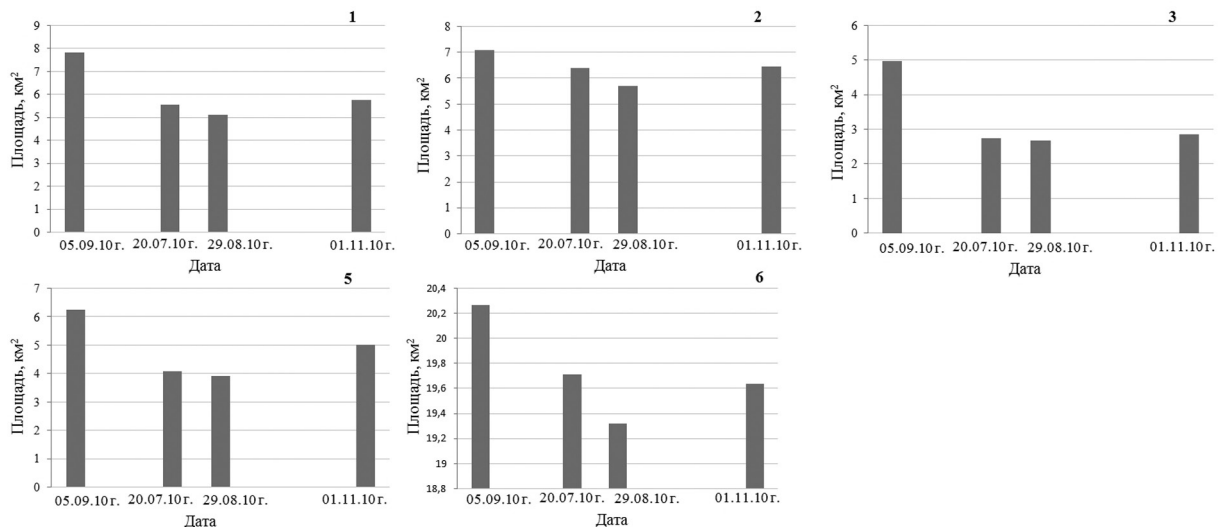


Рис. 5. Коэффициенты озерности (%) территорий тестовых участков № 1–3, 5, 6 в мае, июле, августе и ноябре 2010 г.

1* – показатель озерности по данным ИНОЗ РАН [Измайлова, 2016]

Fig. 5. Lake percentage (%) of test sites No 1–3, 5, 6 in May, June, August and November 2010
1* – Lake percentage by data IL RAS [Izmailova, 2016]

На основе полученных характеристик озерного покрытия были разработаны предварительные карты-схемы озерности для пробной тестовой территории, соответствующие различным периодам водности (начало мая и конец августа 2010 г.) (рис. 6).

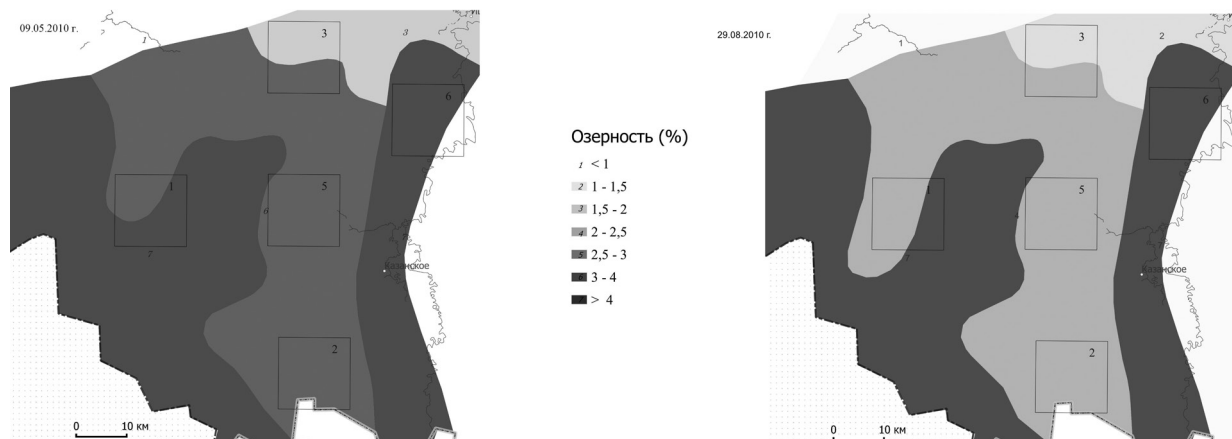


Рис. 6. Озерность региона исследования в мае и августе 2010 г.
Fig. 6. Lake percentage of study area in May and August 2010

Расширение шкалы значений, а также введение дополнительных тестовых площадей (фрагменты № 2, 5, 6), уточняющих результаты проведенной ранее оценки, делают более обоснованным разграничение озерных районов при детальной визуализации пространственной и временной неоднородности озерного водного покрытия.

ВЫВОДЫ

Регионы недостаточного увлажнения характеризуются низкой лимнологической изученностью, лишь относительно небольшое количество расположенных здесь озер входит в систему мониторинга Росгидромета. Оценка временной изменчивости озерных водных ресурсов таких регионов требует специального методического обоснования и, в значительной степени, может быть решена за счет использования спутниковых данных за различные по водности годы и сезоны. Данные по временной изменчивости площадей зеркала тестовых озер, расположенных в регионах недостаточного увлажнения, полученные на основе анализа спутниковой информации, дают возможность оценить изменения площадей водной поверхности обширных территорий в годы разной водности и в разные периоды.

В связи со значительными внутригодовыми изменениями уровня воды исследования многолетней динамики водоемов зоны водного дефицита по космическим снимкам целесообразно проводить на основе анализа сцен, полученных за разные годы за близкие даты съемки.

На основе изучения разновременных спутниковых снимков выявлено уменьшение коэффициентов озерности тестовых территорий на юге Тюменской области в различные периоды водности, превышающее для некоторых районов 1,2 %. Анализ построенных для небольшого тестового региона карт озерности, а также полученных характеристик временной динамики водной поверхности показал, что описанный в статье подход позволяет проводить необходимые уточнения результатов оценки водных ресурсов озер РФ для наиболее нуждающихся в водных ресурсах регионов.

В дальнейшем предполагается продолжить начатую работу и, с учетом накопленного опыта, провести оценку изменений площадей водной поверхности уже в двух временных масштабах – для лет различной водности (очень многоводные годы ($P < 16,7\%$), многоводные годы ($16,7\% \leq P < 33,3\%$), средние по водности годы ($33,3\% \leq P < 66,7\%$), маловодные годы ($66,7\% < P \leq 83,3\%$) и очень маловодные годы ($P > 83,3\%$) и для наблюдаемых в такие годы минимальных и максимальных месячных значений уровня воды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2014-0005 (гос. регистрация № АААА-А18-118021590191-6) «Пространственная структура озерных и речных водных ресурсов России и ее изменение во времени».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the state task No 0154-2014-0005 "Spatial structure of lake and river water resources of Russia and its change in time".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас мирового водного баланса / приложение к монографии «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли». М.; Л.: Гидрометеиздат, 1974. 65 карт.
2. Водно-болотные угодья России / Под общ. ред. В.Г. Кривенко. Т. 1. Водно-болотные угодья международного значения. М., 1998. 255 с.
3. Измайлова А.В. Водные ресурсы озер Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-4(5-14).

4. *Измайлова А.В., Шмакова М.В.* Временная изменчивость водных ресурсов озер, расположенных в регионах недостаточного увлажнения. Всерос. научная конф. с междунар. участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов», Москва, 15–18 сентября 2015.
5. *Курганович К.А., Носкова Е.В.* Использование водных индексов для оценки измерения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // Вестн. ЗабГУ. 2015. № 6 (121). С. 16–23.
6. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. No 27. P. 3025–3033.

REFERENCES

1. Atlas of world water balance. World water balance and water resources of the Earth. M.; L., 1974. 65 maps (in Russian).
2. *Izmailova A.V.* Water resources of the lakes of Russia. Geography and natural resources. 2016. No 4. P. 5–14 (in Russian). DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-4(5-14).
3. *Izmailova A.V., Shmakova M.V.* Temporal variability of lakes water resources located in the regions of insufficient moisture. Fundamental Problems of Water and Water resources: proceedings of IV Russian Scientific. Conference. M.: Water Problems Institute RAS, 2015. P. 69–82 (in Russian).
4. *Kurganovich K.A., Noskova E.V.* The estimation of water surface variations of steppe soda lakes in the southeast of transbaikale with using of remote sensing of water indices. Vestn. Zab. Gos. Univ. (Transbaikal State University Journal). 2015. No 6 (121). P. 16–23 (in Russian).
5. Wetlands in Russia. V. 1. Wetlands of international importance. Chief editor V.G. Krivenko. M., 1998. 255 p. (in Russian).
6. *Xu H.* Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing. 2006. No 27. P. 3025–3033.

Литинский П.Ю.¹

3D-МОДЕЛЬ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА СНИМКОВ LANDSAT КАК ОСНОВА ГЕОМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БОРЕАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ

АННОТАЦИЯ

Описывается новый подход к использованию снимков Landsat, основанный на создании 3D-модели их спектрального пространства. Модель строится в осях x - y - z , где x и y – две первые главные компоненты логарифмированной матрицы снимка (каналы R, NIR, SWIR2), и z – индекс влажности MSI (отношение SWIR1 / NIR). Эмпирическим путем найденная трансформация более пригодна для бореальных экосистем, чем классическая Tasseled Cap. Сегментация спектрального пространства методом эллипсоидов обеспечивает более точное, по сравнению с традиционными методами, выявление контуров экосистем. Показано, что в спектральном пространстве снимков северотаежной подзоны Восточной Фенноскандии представлены все основные типы биогеоценозов (комплексов *четвертичные отложения + растительность*), и их локализация соответствует экологической типологии. Четко просматриваются экологические ряды лесных автоморфных и гидроморфных экосистем, а также траектории процесса лесовосстановления после рубки, от появления растительности до молодняков, средневозрастных и спелых лесов. Для открытых болот локализация спектральных сегментов соответствует типу водно-минерального питания (олиготрофное или мезотрофное), и степени увлажнения поверхности. Принципиальное отличие данной модели от созданных традиционными методами в том, что результат определяется не схемой закладки ключевых участков, а объективным биофизическим параметром – положением экосистемы в спектральном пространстве. Спектральная модель представляет собой математически формализованный объект, описывающий количественные и качественные характеристики экосистем. Будучи развернутой в географическом пространстве, она превращается в оптимальную картографическую основу для планирования экологически сбалансированного природопользования для обеспечения устойчивого развития территории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоматическое моделирование, таежные экосистемы, классификация снимков Landsat.

Peter Yu. Litinsky²

3D MODEL OF THE SPECTRAL SPACE OF LANDSAT IMAGES AS THE BASIS OF THE BOREAL ECOSYSTEMS GEOMATIC MODEL

ABSTRACT

A new approach to the use of the Landsat images based on 3D modeling of their spectral space is described. The model is built in the x - y - z axes, where x and y are the two first principal components of the image matrix (bands R, NIR, SWIR2) in logarithmic form and z is moisture stress index MSI (SWIR1 / NIR). Empirically found transformation is more suitable for boreal

¹ Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Россия, e-mail: litinsky@sampo.ru

² Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia, e-mail: litinsky@sampo.ru

ecosystems than Tasseled Cap. Segmentation of the spectral space by the method of ellipsoids provides more accurate, in comparison with traditional methods, the delineation of the ecosystem contours. It is shown that in the spectral space of images of the northern taiga subzone of Eastern Fennoscandia all the main types of biogeocenoses (complexes of Quaternary deposits + vegetation) are represented, and their localization corresponds to ecological typology. The ecological series of forest automorphic and hydromorphic ecosystems are clearly visible, as well as the trajectories of reforestation after cutting, from the appearance of vegetation to young growth, middle-aged and mature forests. For mires, the localization of spectral segments corresponds to the type of water and mineral nutrition (oligotrophic or mesotrophic). The fundamental difference between this model and those created by traditional methods is that the result is determined not by the layout of training sites, but by an objective biophysical parameter, i.e. the position of the ecosystem in the spectral space. The spectral model is a mathematically formalized object which describes the quantitative and qualitative characteristics of the ecosystems. Being deployed in geographic space, it becomes an optimal cartographic basis for planning ecologically balanced nature management for sustainable development.

KEYWORDS: geomatic modeling, boreal ecosystems, Landsat images classification.

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое развитие территории может быть обеспечено лишь при понимании принципов функционирования ее природных систем. Прежде всего, необходима актуальная и достоверная информация об их структуре и динамике. В лесной зоне в качестве такой информации обычно используются данные учета лесного фонда. Однако эта информация предназначена для обеспечения хозяйственной деятельности, цель которой – получение древесины, поэтому она соответствующим образом структурирована, и важные экологические характеристики становятся весьма размытыми.

Актуальную информацию могут дать данные дистанционного зондирования – космические сканерные снимки. Наиболее распространенный подход к извлечению информации из снимков – так называемая классификация «с обучением», или «управляемая классификация», представляет собой формальную математическую экстраполяцию характеристик наземных ключевых участков на всю охваченную снимком территорию. Ключевые участки закладываются в соответствии со схемой классификации – некоей априорной типологией земной поверхности, определяемой конкретными задачами исследователей. Данный подход универсален, он может применяться для любых, как биотических, так и абиотических объектов. Снимок рассматривается как многомерная матрица, и для ее анализа применяются стандартные статистические методы. При этом биологическая информация – уровни сигнала в различных диапазонах спектра, определяемые типом и состоянием растительного покрова, практически не учитывается.

В экологических исследованиях более целесообразным представляется иной подход, позволяющий извлечь из снимка значительно большее количество информации. Предлагается идти к созданию модели растительного покрова не от априорной типологии, а от информации снимка – создать видимую трехмерную модель спектрального пространства, понять закономерности его организации, а затем интегрировать спектральную модель с данными о биогеоценотической структуре территории, полученными в результате детальных наземных исследований.

Описываемый подход сформировался в процессе создания геоматической модели наземных экосистем северотаежной подзоны Восточной Фенноскандии. Использовалась оригинальная методика моделирования спектрального пространства сканерных снимков

Landsat [Литинский, 2011]. Было установлено, что спектральная модель четко отражает естественную структуру растительного покрова, определяемую типом четвертичных отложений и условиями водно-минерального питания [Литинский, 2012, 2016]. В данной статье обобщаются методические аспекты, изложенные в указанных публикациях, а также описывается новый метод сегментации спектрального пространства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Природные условия территории

Территория (рис. 1) представляет собой типичный образец континентального оледенения. Четвертичный покров сформирован ледниковыми (моренными), флювиогляциальными песчаными, и песчано-глинистыми озерными отложениями. Значительны площади обнажений коренных пород Балтийского щита. Это обуславливает сложность гидрологических условий и высокую мозаичность растительного покрова. Состояние экосистем также весьма различно – от практически девственного до глубоко антропогенно трансформированного.

По лесорастительному районированию территория относится к среднетаежной подзоне. Около 65 % площади занято лесами, преобладающие породы – сосна обыкновенная и ель европейская. Береза пушистая доминирует во вторичных лесах на ранних стадиях восстановления. Торфяные болота, занимающие до четверти территории, представлены двумя основными типами: олиготрофными сфагновыми и мезотрофными осоково-сфагновыми [Волков и др., 1995; Biotic..., 2003].

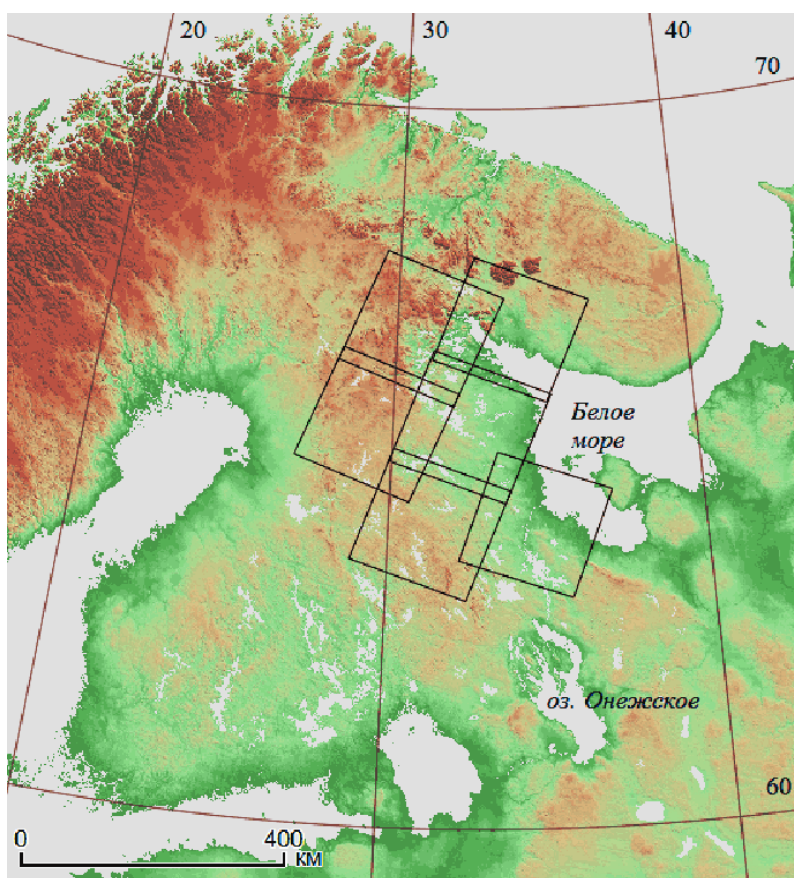


Рис. 1. Локализация сцен сканерных снимков (path 184–188, row 13–15), используемых для создания модели

Fig 1. Localization of the scenes of scanner images (path 184–188, row 13–15) used for the model creation

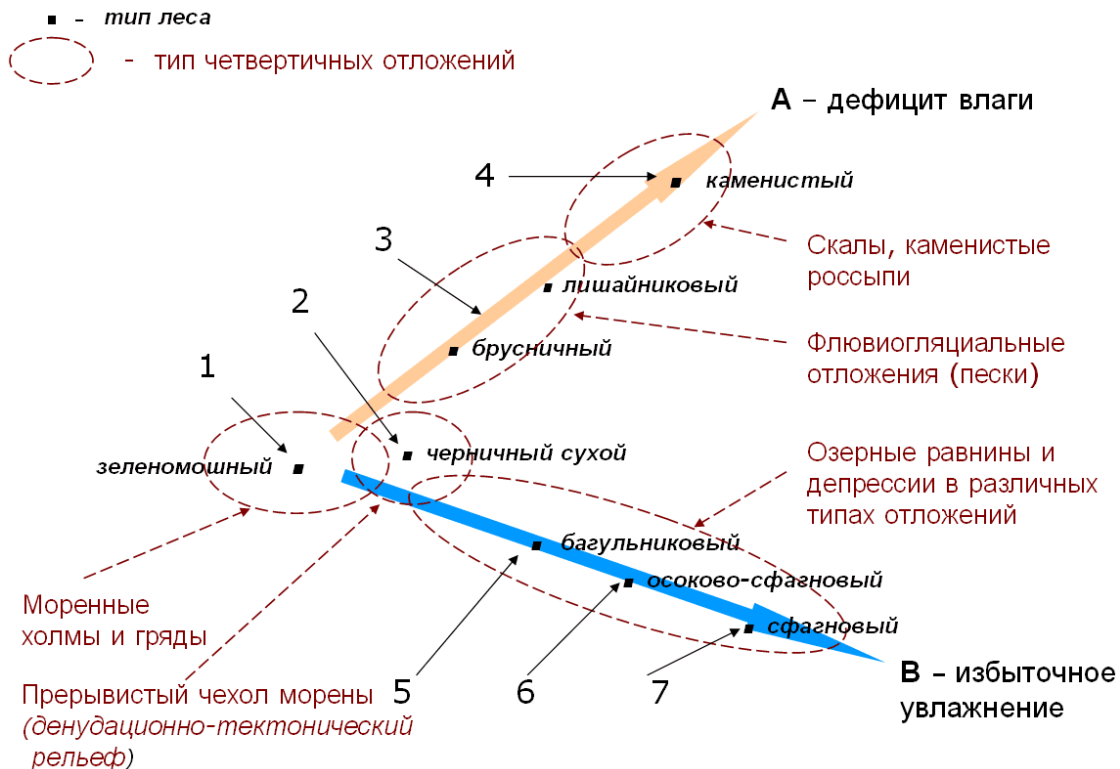


Рис. 2. Упрощенная биогеоценотическая схема сосновых лесов территории:

Цифрами 1–7 показаны экосистемы, положение которых в спектральном пространстве снимка приведено на рис. 5

Fig. 2. The biogeocenotic scheme of pine forests:

Digits 1–7 are the reference points for comparison with the spectral space model shown in Fig. 5

Данные сканирования и программное обеспечение

Использовались снимки Landsat TM и ETM+ 1988–2001 гг., взятые на сайте GLCF <ftp://ftp.glcg.umd.edu/glcg/Landsat/WRS2>. Стандартные операции пре- и постпроцессорной обработки снимков осуществляются с использованием ГИС-пакетов QGIS, GRASS, SAGA [www.qgis.org]. Создание модели спектрального пространства снимков и их классификация проводится с использованием описанного ниже программного модуля. Для 3D-визуализации применяется пакет gnuplot [www.gnuplot.info].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Традиционные методы классификации

Процесс управляемой классификации включает следующие стадии:

- составление схемы классификации (списка целевых категорий земной поверхности);
- закладка наземных ключевых участков в выбранных категориях;
- компьютерная обработка снимка (собственно классификация);
- оценка достоверности классификации.

Проблема в составлении схемы классификации состоит в том, что информация, содержащаяся в снимках, ввиду технических характеристик сканера лишь частично согласуется с представлениями, заложенными в типологии растительности [Пузаченко и др., 1998]. Особенно трудно составить адекватную схему классификации для лесов – наиболее сложно организованных наземных экосистем. Характеристика каждого ключевого участка содержит значительное количество основных параметров – породный состав, возраст, полнота, высота

древостоя. Поэтому результаты обработки одного и того же снимка будут существенно различаться в зависимости от набора целевых категорий и локализации ключевых участков.

Закладка ключевых участков подразумевает определенную дискретность, тогда как растительный покров – целостная, континуальная, самоорганизующаяся физико-химическая система [Pignatti et al., 2002]. Выявить какие-либо закономерности континуальной системы, представленные в виде дискретных статистических показателей, таких как средняя величина, среднеквадратическое отклонение и т. д., практически невозможно. Представляется более целесообразным составлять схему классификации не априори, а исходя из объективных и графически визуализированных данных сканирования.

Наиболее часто для экстраполяции данных ключевых участков используется метод максимального правдоподобия, MLC [Richards, Xiuping, 1999]. Метод требует нормального распределения данных ключевых участков, поэтому приемлемые результаты достигаются только при значительном их количестве [Замятин, 2006; Шаталов и др., 2007]. Применяется также метод гиперпараллелепипедов, метод наименьшего расстояния (minimum distance) и ряд других. С конца XX в. получил распространение метод искусственных нейронных сетей, ANN [Kanellopoulos, Wilkinson, 1997; Zhou, Yang, 2008].

Для оценки достоверности полученных результатов проводится выборочная проверка на местности, которая по сути дела показывает, какой процент площади каждой категории соответствует категории ключевого участка. Насколько при этом соответствует действительности реальная форма объектов, остается неизвестным. Но в экологии важное значение имеет характер территориальной сопряженности экосистем, определяющий межэкосистемные связи, а в гидрологическом моделировании поверхностного стока необходимо совмещение контуров растительности с рельефом. Следовательно, требуется как можно более точное отображение пространственной структуры. Крайне важно это и при совмещении в единое покрытие мозаики разновременных снимков.

Принципиальный недостаток традиционного подхода в том, что при любом математическом методе обработки абстрактное многомерное спектральное пространство снимка остается «черным ящиком». Оно рассматривается как числовая информация, не имеющая биологического смысла. Исследователь не может оценить реальные размеры и расположение категорий, их пространственную сопряженность, то есть в прямом смысле слова действует вслепую, особенно при использовании методов MLC и ANN.

Между тем, спектральное пространство снимка Landsat достаточно просто визуализировать. Установлено, что информация шести спектральных каналов сканера о растительном покрове почти без потерь может быть сведена к трем основным компонентам (синтезированным каналам), характеризующим: 1) общую яркость; 2) количество фотосинтезирующей биомассы и 3) влагообеспеченность растительных клеток, соответственно brightness, greenness, wetness [Kauth, Thomas, 1976; Huang et al., 2002] (так называемая Tasseled Cap-трансформация). Для визуализации трехмерного пространства разработано множество программных средств, однако синтезированные каналы Tasseled Cap используются в основном лишь как исходная информация для той же управляемой классификации, или же для демонстрации тех или иных частных закономерностей в виде двух двухмерных графиков brightness/greenness и brightness/wetness [Cohen et al., 1995; Krankina et al., 2008].

Трансформация спектрального пространства

Tasseled Cap-трансформация обеспечивает оптимальное представление всех растительных экосистем, т. е. она пригодна, в том числе, и для создания модели спектрального пространства снимков таежных территорий. Однако здесь основной объект изучения – леса, имеющие средний уровень яркости, а основную часть спектрального пространства занимают наиболее яркие болота и вырубки. Сделать пространство более «компактным»,

одновременно расширив «лесную» область, можно путем логарифмирования матрицы снимка с последующим расчетом двух первых главных компонент (далее обозначаются LC1 и LC2 соответственно). Трансформация найдена эмпирическим путем [Литинский, 2011].

Ось LC1 практически идентична *brightness*, LC2 обратна *greenness*, т. е. с ее увеличением количество фотосинтезирующей биомассы снижается. В качестве третьей оси используется индекс стресса влажности MSI (отношение каналов SWIR1 и NIR), его величина обратна *wetness* – с его увеличением растет дефицит влаги фотосинтезирующих клеток. При такой трансформации спектральное пространство более просто организовано (описывается более простыми математическими уравнениями) и удобно для визуального анализа, чем при использовании Tasseled Cap (рис. 3). Для снимков Landsat ETM+ оси координат рассчитываются по формулам (*expressions* модуля GRASS *r.mapcalc*):

$$LC1 = 0,2793 \cdot \ln(b3) + 0,7786 \cdot \ln(b4) + 0,5619 \cdot \ln(b7)$$

$$LC2 = 0,5887 \cdot \ln(b3) - 0,6012 \cdot \ln(b4) + 0,5404 \cdot \ln(b7)$$

$$MSI = b5/b4,$$

где **b3–b7** – файлы соответствующих каналов снимка; **ln** – натуральный логарифм.

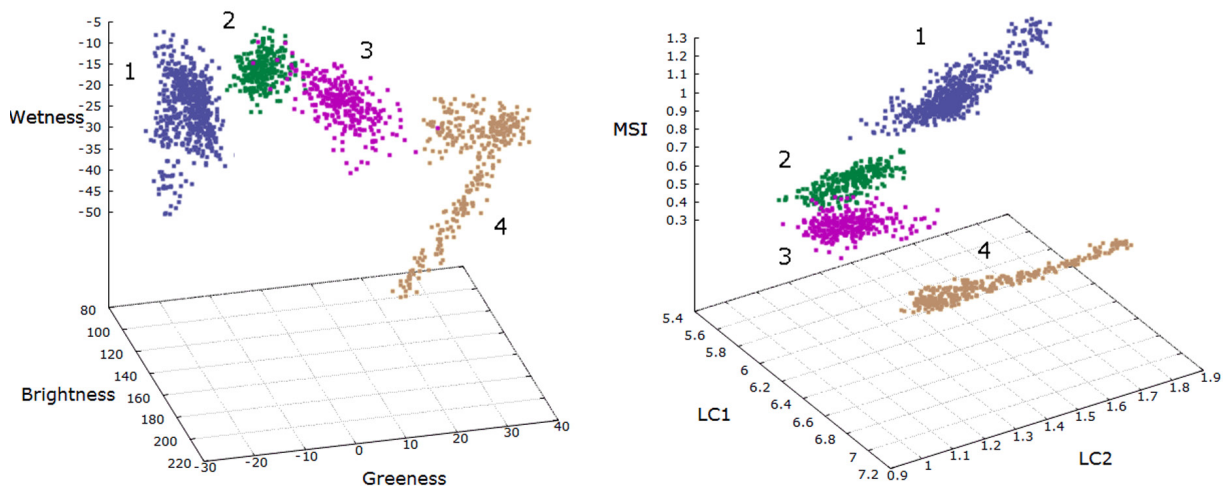


Рис. 3. Сравнение Tasseled Cap (слева) и LC1-LC2-MSI трансформаций: облака точек одинаковых болотных (1 и 4) и лесных (2 и 3) участков

Fig. 3. The comparison of Tasseled Cap (left) and LC1-LC2-MSI transformations: signature clouds of the same mire (1 and 4) and forest (2 and 3) plots

Сегментация спектрального пространства

Для определения положения и размеров эллипсоидного сегмента каждой категории облако точек проецируется на плоскость LC1-LC2 (*x* и *y*, соответственно). Направление главной оси эллипса рассчитывается по линии регрессии $y = ax + b$ (рис. 4, справа). Размеры эллипса *l*, *h* определяются по координатам максимально удаленных от центра облака точек в системе координат, ось абсцисс которой параллельна линии регрессии. Положение центральной плоскости эллипсоида в размерности MSI (*z*) рассчитывается по уравнению регрессии от двух переменных $z = cx + dy + e$ (рис. 4, слева).

Таким образом, при данном способе сегментации точно фиксируется форма категории, ее размеры и положение в пространстве. В традиционных методах задаются лишь координаты центра категории и ее некие габаритные размеры, а форма принимается соответствующей параллелепипеду или шару, в зависимости от метода (*parallelepiped*, *minimum distance*, *MLC*).

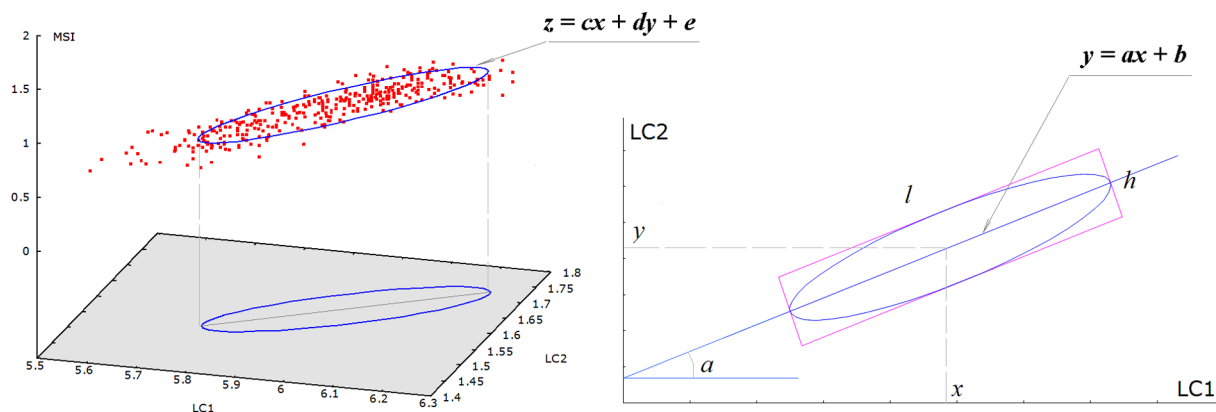


Рис. 4. Схема вычисления параметров сегментации
Fig. 4. The scheme for calculating segmentation parameters

Для обработки снимка согласно приведенным на рис. 4 параметрам в пределах эллипса задаются несколько точек (например, две в центрах эллипса и 4–8 по его периметру), 3D-координаты которых служат параметрами для классификации методом минимального расстояния. Для реализации этого алгоритма был разработан специальный программный модуль. На вход подается текстовый файл LC1-LC2-MSI (облако красных точек на рис. 4 слева); на выходе – текстовые файлы, содержащие: 1) параметры x, y, a, l, h, c, d, e ; 2) массив 3D-координат огибающей эллипсоида (синяя линия на рис. 4 слева); 3) 3D-координаты точек для классификации снимка. Исходные облака для каждой категории могут быть получены, например, с использованием модуля GRASS r.what.

Модель спектрального пространства таежных экосистем

Экосистемы спелых лесов формируют в спектральном пространстве V-образную структуру (рис. 5, оси А и В), почти полностью совпадающую по форме с биогеоэкологической схемой, представленной выше на рис. 2. В основании располагаются зеленомошные сосняки (1) и ельники (8) моренных гряд. Здесь обеспечиваются оптимальные условия по увлажнению и наличию минеральных питательных веществ. Для упрощения показаны лишь центры эллипсоидов категорий.

По оси А сухих местообитаний (1–3–4) с недостаточным увлажнением и минеральным питанием выстраиваются сосняки брусничные (3) флювиогляциальных равнин, затем идут сосняки каменистые / скальные (4) на выходах кристаллических пород, с моренным чехлом небольшой мощности. Класс 2 можно рассматривать как правую часть сегмента 1 – смешанные сосново-еловые леса с низкой сомкнутостью полога, занимающие более бедные по сравнению с классом 1 местообитания.

На оси В гидроморфных местообитаний (1–5–6–7) с избыточным застойным увлажнением располагаются сосняки багульниковые (5), затем сосняки сфагновые (7) и – несколько в стороне – осоково-сфагновые (6). Крупные массивы таких лесов обычно располагаются на озерных равнинах, небольшие фрагменты – в любых недостаточно дренированных депрессиях.

В возникающих на местах вырубок лесах четко вырисовываются траектория восстановительной динамики от появления растительности (11) до молодняков (12–13), средневозрастных (14) и приспевающих (15) лесов.

Для болотных экосистем положение спектральных сегментов также определяется типом водно-минерального питания – олиготрофное (21–24) или мезотрофное (41–44), и степенью увлажнения поверхности (номер класса уменьшается с ее повышением). Четко обособленное положение от лесных и болотных экосистем занимают сегменты травянистой растительности (51–55), дороги, карьеры и другие лишенные растительности категории (81–84).

Таким образом, выделяются все основные типы биогеоценозов, каждый из которых характеризуется определенными величинами биомассы, пулом углерода, составом древостоя, трофностью и влажностью почвы, типом напочвенного покрова и т. д.

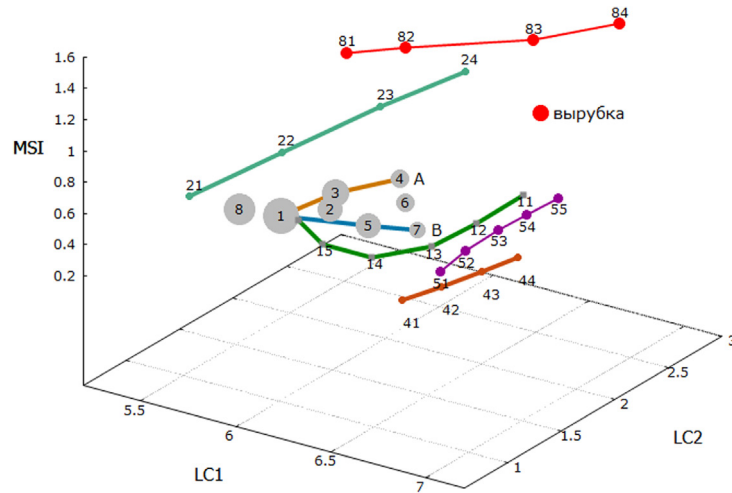


Рис. 5. Модель спектрального пространства снимка Landsat (номера классов экосистем приведены в тексте)

Fig. 5. The model of the spectral space of the Landsat image (the numbers of ecosystem classes are given in the text)

Модель спектрального пространства дает возможность строгого математического описания траекторий, как типов местообитаний (структуры), так и различных сукцессионных стадий (рис. 6). Линия в 3D-пространстве описывается системой двух уравнений вида:

$$\begin{aligned} y &= f_1(x); \\ z &= f_2(x, y); \end{aligned}$$

где x, y, z – LC1, LC2, MSI, соответственно; f_1, f_2 – полиномиальная регрессия 1–3 степени.

Принцип описания траектории тот же, что и для построения огибающей эллипсоидов отдельных категорий: первое уравнение описывает линию проекции траектории на плоскость LC1–LC2, второе – положение траектории в третьем измерении – MSI. Эти уравнения могут использоваться как передаточные функции для расчета различных экосистемных параметров – биомасса, пул углерода и т. д.

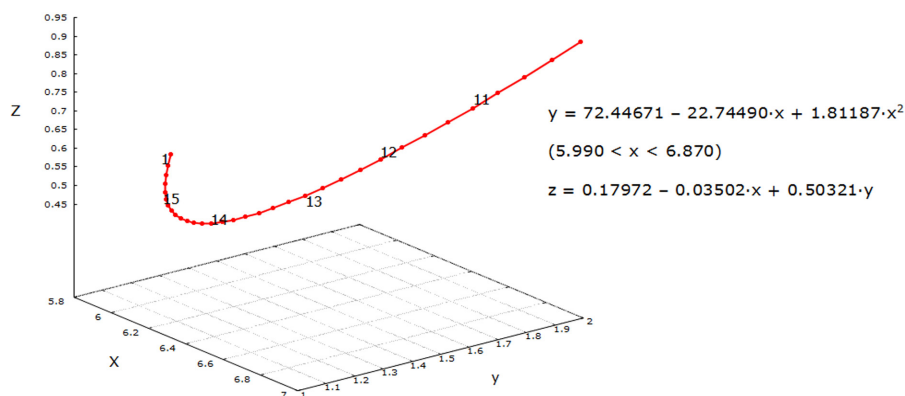


Рис. 6. Траектория лесовозобновления в спектральном пространстве.

Номера классов те же, что и на рис. 5

Fig. 6. Trajectory of reforestation in the spectral space.
The class numbers are the same as in Fig. 5.

Рис. 5 и 6 показывают, что спектральное пространство снимка Landsat представляет собой сложную систему областей и траекторий, которые могут быть достаточно адекватно интерпретированы в экологическом смысле. Возможность трехмерной визуализации пространства, рассмотрения его с любой желаемой стороны позволяет выявить закономерности, которые невозможно обнаружить традиционными методами. Это позволяет выявить категории, разделение которых невозможно вследствие технических ограничений сканера. Модель спектрального пространства может также наглядно показать причины ошибочных результатов управляемой классификации. Теоретически, управляемая классификация может дать достаточно достоверную карту растительного покрова – но лишь при наличии ключевых участков, представляющих все категории земной поверхности, плотно заполняющие все спектральное пространство, в количестве, обеспечивающем статистическую достоверность для каждой категории. Очевидно, что эта задача практически неразрешима, в том числе и потому, что разработать столь полную схему закладки ключевых участков без модели спектрального пространства невозможно.

Однако даже если бы она была каким-то образом решена, полученная карта была бы дискретна в соответствии с заданной схемой классификации. При наличии же модели спектрального пространства становится возможной интерполяция промежуточных характеристик: логично предположить, что в промежутке спектрального пространства между сегментами с известными свойствами будут располагаться области переходных зон (эко-тонов). Промежуточный класс можно получить путем простого добавления нескольких строк с координатами LC1–LC2–MSI в таблицу статистик для *minimum distance classification*. Таким образом, классификация становится действительно *управляемой*.

Традиционная методика классификации однонаправлена – от ключевых участков ко всему снимку. Спектральная модель обеспечивает позиционированную взаимосвязь между географическим и спектральным пространствами, т. е. при отсутствии наземных данных появляется возможность установить, где на местности находятся экосистемы, соответствующие данной области спектрального пространства.

Эти возможности определяют и методику создания геоматической модели растительного покрова. Из разовой акции она превращается в постепенный исследовательский процесс выяснения соответствия между областями спектральной модели и наземными данными. Схема классификации перестает быть наперед заданной, а формируется и уточняется в процессе моделирования спектрального пространства, иными словами, спектральная модель и представляет собой основу схемы классификации. Выборочная оценка достоверности становится не конечным, а промежуточным этапом формирования модели.

Основное, принципиальное отличие описываемой модели экосистем от созданных традиционными методами в том, что результат определяется не выбором наземных ключевых участков, который в той или иной степени субъективен, а объективным, *измеряемым* биофизическим параметром – положением экосистемы в спектральном пространстве снимка. Модель спектрального пространства представляет собой математически формализованный объект, описывающий количественные и качественные характеристики биогеоценозов. Будучи «развернутой» в географическом пространстве, она превращается в карту, которая включает все основные классы первичных экосистем, а также различные варианты и стадии их естественных и антропогенных нарушений, с детализацией, примерно соответствующей масштабу 1 : 25 000 (рис. 7). По структуре информации геоматическая модель близка к планам лесонасаждений, которые являются первичной основой для данных учета лесного фонда – т. е. тем данным, которые до настоящего времени использовались для описания лесов территории. Таким образом, в распоряжении исследователей оказывается не прошедшая несколько уровней генерализации хозяйственно-

ориентированная, а исходная биологическая информация. Кроме того, геоматическая модель обеспечивает значительно более детальную, по сравнению с планами лесонасаждений, информацию о болотах, занимающих большую часть (до 30 %) территории.

Верификация геоматической модели проводилась путем сопоставления с независимо создаваемой базой данных экотопов с координатной привязкой, и с учетом различной степени генерализации соответствие оказалось почти стопроцентным [Крышень, Литинский, 2013].

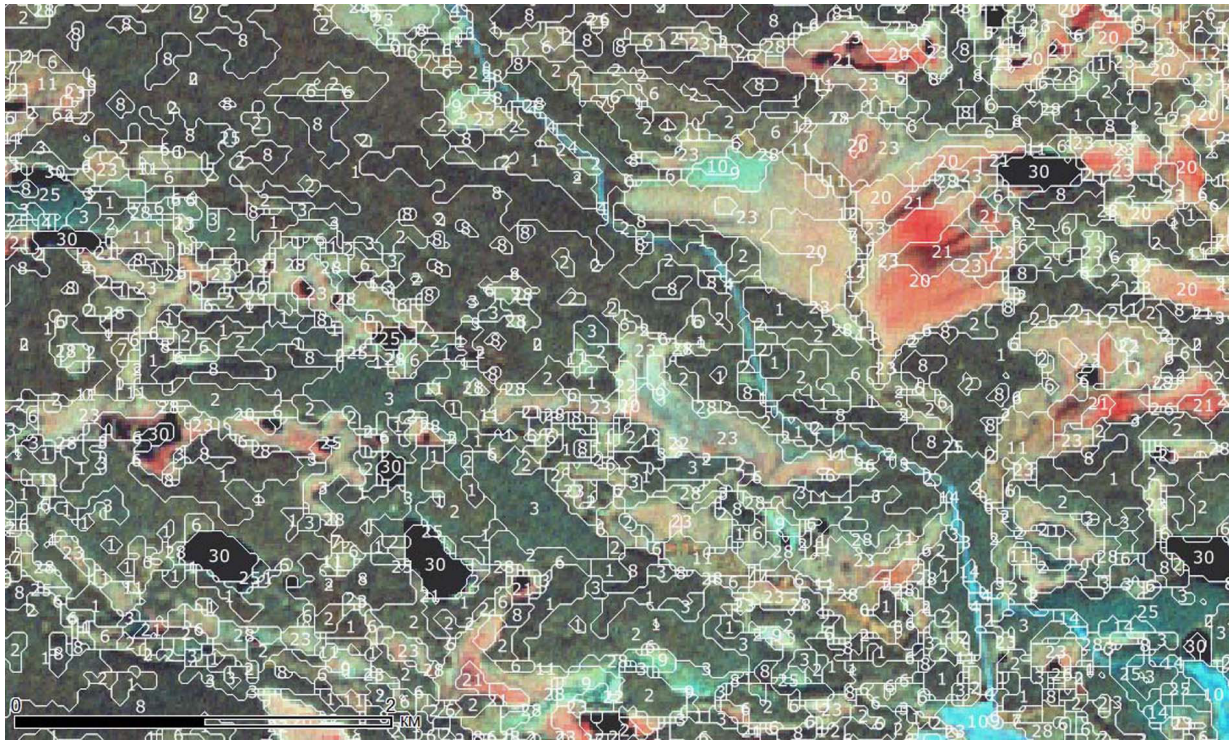


Рис. 7. Фрагмент векторного слоя геоматической модели.

Координаты центра 64.5491 N, 30.6295 E. Номера категорий те же, что и на рис. 5

Fig. 7. A fragment of the vector layer of vegetation model.

Coordinates of the center 64.5491 N, 30.6295 E. The numbers of classes are the same as in Fig. 5

ВЫВОДЫ

Описанный подход к обработке сканерных снимков представляет собой интеграцию двух массивов информации:

- 1 – графически выраженного представления о биогеоценотической структуре территории, сформированного в результате наземных исследований;
- 2 – трехмерной модели спектрального пространства, созданной на основе измеренных сканером биофизических характеристик экосистем.

Для создания модели спектрального пространства используется трансформация LC1–LC2–MSI, более подходящая для бореальных экосистем, чем Tasseled Cap. Сегментация спектрального пространства методом эллипсоидов обеспечивает более точное, по сравнению с традиционными методами, выявление пространственной конфигурации контуров экосистем.

В северотаежной подзоне Восточной Финноскандии локализация сегментов лесных экосистем в спектральном пространстве почти полностью совпадает с биогеоценотической схемой лесов. Тип биогеоценоза определяет все его характеристики: тип почвы, типы

леса, его породный состав и продуктивность и т. д. На разновременных снимках по положению в спектральном пространстве выявляется объективная возрастная структура лесов. Таким образом, созданная на основе модели спектрального пространства геоматическая модель представляет собой наиболее адекватную картографическую основу для планирования экологически сбалансированного природопользования для обеспечения устойчивого развития. В практическом смысле очень важно, что необходимые для реализации этих задач сканерные снимки и программные средства общедоступны и бесплатны.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the State task of the Northern Water Problems Institute KarRC RAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.Д., Громцев А.Н., Еруков Г.В. и др. Экосистемы ландшафтов запада северной тайги (структура, динамика). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. 194 с.
2. Замятин А.В. Анализ динамики ландшафтного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 50–64.
3. Крышень А.М., Литинский П.Ю. Сопоставление и взаимная верификация геоинформационной и эколого-динамической моделей разнообразия лесных экосистем // Труды КарНЦ РАН. 2013. № 2. С. 86–91. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=10572>
4. Литинский П.Ю. Классификация сканерных снимков методом моделирования спектрального пространства // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 5. С. 45–54. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=8809>
5. Литинский П.Ю. Геоинформационная модель наземных экосистем северотаежной подзоны восточной Фенноскандии // Труды КарНЦ РАН. 2012. № 1. С. 3–15. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=9352>
6. Литинский П.Ю. Геоинформационная модель наземных экосистем Прибеломорской низменности // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 3. С. 3–9. DOI: 10.17076/bg221.
7. Пузаченко Ю.Г., Алещенко Г.М., Молчанов Г.С., Пузаченко А.Ю. Анализ аэрофотоизображения для выделения типов территориальных структур // Материалы второго все-рос. совещ. «Аэрокосмические методы и геоинформационные системы в лесоведении и лесном хозяйстве». М., 1998. С. 156–159.
8. Шаталов А.В., Жирин В.М., Сухих В.И. и др. Анализ информативности космических снимков высокого разрешения QuickBird // Междунар. конф. «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве». М., 2007. С. 168–174.
9. Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2003. 244 p.
10. Cohen W.B., Spies T.A., Fiorella M. Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, U.S.A. Int. J. Remote Sensing. 1995. V. 16, No 4. P. 721–746.
11. Hirata Y., Takahashi T. Image segmentation and classification of Landsat Thematic Mapper data using a sampling approach for forest cover assessment. Can. J. For. Res. 41(1). P. 35–43. DOI: 10.1139/X10-130.

12. *Huang C., Yang Wylie L., Homer Collin, Zylstra G.* Derivation of a Tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance: USGS Staff - Published Research. 2002. Paper 621. <http://digitalcommons.unl.edu/usgsstaffpub/6>
13. *Kanellopoulos I., Wilkinson G.G.* Strategies and best practice for neural network image classification // *International Journal of Remote Sensing*. 1997. 18(4). P. 711–725.
14. *Kauth R.J., Thomas G.S.* The Tasseled Cap a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat // *Proceedings on the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, 4b: 41–51, 6 June 2 July 1976 (West Lafayette, Indiana: LARS, Purdue University).
15. *Krankina O.N., Pflugmacher D., Friedl M., Cohen W.B., Nelson P., Bacini A.* Meeting the challenge of mapping peatlands with remotely sensed data, *Biogeosciences Discuss.* 2008. 5. P. 2075–2101. DOI: 10.5194/bgd-5-2075-2008.
16. *Pignatti S., Box E.O., Fujiwara K.* A new paradigm for the XXIth century // *Ann. Bot.* 2002. V. 2. P. 3057.
17. *Richards J.A., Xiuping Jia.* *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin, Springer, 1999. 400 p.
18. *Zhou L., Yang X.* Use of neural networks for land cover classification from remotely sensed imagery, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. V. XXXVII. Part B 7. Beijing. 2008. P. 575–578.

REFERENCES

1. Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS. 2003. 244 p.
2. *Cohen W.B., Spies T.A., Fiorella M.* Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, U.S.A. *Int. J. Remote Sensing*. 1995. V. 16, No 4. P. 721–746.
3. *Hirata Y., Takahashi T.* Image segmentation and classification of Landsat Thematic Mapper data using a sampling approach for forest cover assessment. *Can. J. For. Res.* 41(1). P. 35–43. DOI: 10.1139/X10-130.
4. *Huang C., Yang Wylie L., Homer Collin, Zylstra G.* Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance: USGS Staff - Published Research. 2002. Paper 621. <http://digitalcommons.unl.edu/usgsstaffpub/6>
5. *Kanellopoulos I., Wilkinson G.G.* Strategies and best practice for neural network image classification. *International Journal of Remote Sensing*. 1997. 18(4). P. 711–725.
6. *Kauth R.J., Thomas G.S.* The Tasseled Cap a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: *Proceedings on the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, 4b: 41–51, 6 June 2 July 1976 (West Lafayette, Indiana: LARS, Purdue University).
7. *Krankina O.N., Pflugmacher D., Friedl M., Cohen W.B., Nelson P., Bacini A.* Meeting the challenge of mapping peatlands with remotely sensed data, *Biogeosciences Discuss.* 5. 2075–2101. DOI: 10.5194/bgd-5-2075-2008.
8. *Kryshen A., Litinsky P.* Comparison and mutual verification of the geoinformation and the ecological dynamics models of forest ecosystems diversity. *Trudy KarNTS RAN*. 2013. No 2. P. 86–91. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=10572&plang=e> (in Russian).
9. *Litinsky P.* Multispectral imagery classification method based on spectral space modeling. *Trudy KarNTS RAN*. 2011. No 5. P. 45–54. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=8809> (in Russian).
10. *Litinsky P.* Geoinformation model of Eastern Fennoscandia northern taiga ecosystems. *Trudy KarNTS RAN*. 2012. No 1. P. 3–15. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=9352&plang=e> (in Russian).

11. *Litinsky P.* Geoinformation Model of Terrestrial Ecosystems of the White Sea Lowland. Trudy KarNTS RAN. 2016. No 3. C. 3–9. DOI: 10.17076/bg221 (in Russian).
12. *Pignatti S., Box E.O., Fujiwara K.* A new paradigm for the XXIth century. Ann. Bot. 2002. V. 2. P. 3057.
13. *Puzachenko Yu.G., Aleshchenko G.M., Molchanov G.S., Puzachenko A.Yu.* Analysis of aerophoto images for distinguishing the types of territorial structures. Proc of 2nd all-Russian conference "Aerospace methods and geoinformation systems in forest science and forestry economy". M., 1998. P. 156–159.
14. *Richards J.A., Xiuping Jia.* Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin, Springer, 1999. 400 p.
15. *Shatalov A.V., Zhirin V. M., Sukhikh V.I. et al.* Analysis of the information content of high-resolution QuickBird images. Int Conf "Aerospace methods and geoinformation technologies in forest science and forestry". M., 2007. P. 168–174.
16. *Volkov A.D., Gromtzev A.N., Erukov G.V. et al.* Ecosystems of north-west taiga landscapes (structure, dynamics). Petrozavodsk: KarNTS RAN, 1995. 194 p. (in Russian).
17. *Zamyatin A.V.* Analysis of landscape cover dynamics on the basis of data of remote sensing of the Earth. Research of the Earth from Space. 2006. No 6. P. 50–64.
18. *Zhou L., Yang X.* Use of neural networks for land cover classification from remotely sensed imagery, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. XXXVII, part B7. Beijing. 2008. P. 575–578.

Паниди Е.А.¹, Рыкин И.С.², Цепелев В.Ю.³

О ПРОБЛЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ГРАНИЦ ВЕГЕТАЦИОННЫХ СЕЗОНОВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Многие исследовательские задачи и задачи мониторинга природной среды требуют выполнения оценок временных границ и продолжительности вегетационных сезонов, выделяемых с учетом перехода температуры приземного воздуха через пороговые значения +5 и +10 °С. Выполнение подобных оценок на основе анализа годового хода температуры воздуха в ряде ситуаций оказывается затруднительным с учетом высокой динамики температуры и возможности продолжительных колебаний вокруг пороговых значений. Кроме того, наблюдения температуры воздуха выполняются на метеорологических станциях, сеть которых во многих случаях оказывается весьма разреженной. В результате, для выполнения оценок пространственного распределения и пространственно-временной динамики граничных дат и продолжительности вегетационных сезонов требуется пространственная интерполяция данных, что приводит к значительным ошибкам в оценках.

В настоящей работе рассмотрен метод определения границ весеннего, летнего и осеннего вегетационных сезонов на основе анализа графиков годового хода нормализованного разностного водного индекса (NDWI), вычисление которого может быть выполнено на основе материалов спутниковых съемок. При этом могут быть построены серии карт пространственного распределения индекса, что позволяет выполнять оценку пространственной неоднородности и динамики вегетационных сезонов без применения интерполяции. В работе кратко описан метод оценки граничных дат вегетационных сезонов с использованием данных NDWI, и представлены некоторые результаты оценки соответствия определений граничных дат по данным NDWI и по данным мониторинга приземной температуры воздуха на метеорологических станциях. Сделаны выводы о вероятной согласованности оценок на основе NDWI с динамикой вегетационных фаз и о необходимости дальнейшего накопления и статистического анализа данных спутниковых и наземных наблюдений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вегетационные сезоны, наземные метеорологические наблюдения, данные дистанционного зондирования, MODIS, NDWI.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, каф. картографии и геоинформатики, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail:* panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, каф. картографии и геоинформатики, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail:* ivan.rykin94@gmail.com, st059068@student.spbu.ru

³ Российский государственный гидрометеорологический университет, Метеорологический факультет, каф. метеорологических прогнозов, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail:* v0010200@mail.ru

Evgeny A. Panidi¹, Ivan S. Rykin², Valery Yu. Tsepelev³

TOWARDS THE ISSUE OF ALLOCATION OF THE TIME FRAMES FOR GROWING SEASONS USING GROUND OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

Many scientific and environmental monitoring projects require estimations of the time frames and duration of the growing seasons, which allocated by detecting transition of surface air temperature through the thresholds of +5 °C and +10 °C. Such estimations usually based on the analysis of surface air temperature annual graphs. However, in a number of situations it become difficult due to the high dynamics of the temperature and to the possibility of long-term temperature fluctuations around the thresholds. In addition, observations of surface air temperature are performed at the meteorological stations, while observation network, in many cases, appears to be too sparse. As a result, spatial interpolation is required to estimate spatial distribution and spatial dynamics of time frames and duration of growing seasons, which leads to significant errors in the estimations.

In this paper, we consider a method of time frames determining for the spring, summer and autumn growing seasons on the basis of Normalized Difference Water Index (NDWI) annual graph analysis. Computation of the NDWI can be performed on the basis of satellite imagery. In this case, a map series reflecting spatial distribution of the index can be produced, which allows to estimate spatial heterogeneity and spatial dynamics of growing seasons without use of interpolation. The paper describes briefly a method applied to estimate framing dates of the growing seasons using NDWI data, and presents some results of consistency assessment of the framing dates estimations produced on the basis of NDWI and on the basis of surface air temperature monitoring at the meteorological stations. Conclusions are drawn about probable consistency of NDWI-based estimations of growing season framing dates with dynamics of vegetation phases, and about need of further accumulation and statistical analysis of satellite and ground-based observations.

KEYWORDS: Growing Seasons, Ground Meteorological Observations, Remote Sensing Data, MODIS, NDWI.

ВВЕДЕНИЕ

Под вегетационными сезонами в настоящем исследовании понимаются периоды, при которых температура приземного воздуха находится в пределах от +5 до +10 °C (весенний сезон – сезон начала вегетации), выше +10 °C (летний сезон – сезон активной вегетации) и от +10 до +5 °C (осенний сезон – сезон завершения вегетации) [Справочник по климату СССР..., 1968]. Задача определения граничных дат вегетационных сезонов достаточно часто возникает, например, при проведении исследований и изысканий в области климатологии и агрометеорологии.

Вместе с тем, известные из публикаций методы определения дат устойчивого перехода средней суточной температуры через некоторые пороговые значения заметно разнятся в получаемых результатах, не позволяя однозначно идентифицировать даты начала

¹ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, St. Petersburg, Russia, *e-mail:* **panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru**

² Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, St. Petersburg, Russia, *e-mail:* **ivan.rykin94@gmail.com, st059068@student.spbu.ru**

³ Russian State Hydrometeorological University, Meteorological Faculty, Department of Meteorological Forecasts, St. Petersburg, Russia, *e-mail:* **v0010200@mail.ru**

и окончания вегетационных сезонов при наличии колебаний температуры в районе порогового значения в течение некоторого количества дней. В таких случаях возникают вопросы обоснованности и достоверности рассчитанных дат смены вегетационных сезонов.

Например, весьма широко используемым в климатологии является метод Педя, предложенный в 50-х гг. прошлого столетия [Педь, 1951], который предполагает выбор устойчивой даты перехода температуры через пороговое значение, в случае наличия колебаний температуры вокруг порогового значения, на основе сравнения сумм температур, накопленных за периоды между первым и последующими переходами через пороговое значение. В качестве альтернативы, под устойчивым переходом температуры через пороговое значение может быть принят тот день, после которого не возникало обратного перехода. Вместе с тем, данные методы не позволяют достаточно четко определить даты устойчивого перехода, при наличии нескольких длительных переходов в разные стороны от порогового значения температуры [Скриник, Сніжко, 2008]. Особенно сильно данный недостаток проявляется при определении границ вегетационных сезонов, изменение которых, в общем случае, подвержено другим факторам, помимо колебаний температуры воздуха. Наиболее сложно выполнять подобные определения в северных регионах, где температурный режим характеризуется существенными колебаниями. Отдельные исследователи предлагают определять граничные даты сезонов методом скользящего окна, осредняя даты за некоторый продолжительный промежуток времени [Скрынник О.Я., Скрынник О.А., 2009]. Такой подход позволяет сгладить колебания, вызванные погодными аномалиями, однако подразумевает невозможность выполнения определений на краях (в начале и в конце) ряда наблюдений, в связи с необходимостью осреднения данных.

Значительное количество исследований посвящено изучению взаимосвязи динамики климатических параметров и параметров растительного покрова [Stow et al., 2004; Goetz et al., 2007; Jia et al., 2009]. В данных работах сделаны выводы о наличии устойчивых взаимосвязей между динамикой температуры воздуха и, например, динамикой фитомассы кустарникового растительного покрова. Возможным решением проблемы определения граничных дат вегетационных сезонов авторы настоящего исследования видят определение границ сезонов на основе материалов спутникового мониторинга растительного покрова, в частности, на основе анализа временных серий вегетационных индексов, рассчитываемых по материалам спутниковых съемок. Подобного рода исследования известны из целого ряда публикаций, однако, другие авторы [Delbart et al., 2005; Медведева и др., 2008; Семенова, 2015] рассматривают лишь вопрос выделения границ полного сезона вегетации, без разделения на весенний, летний и осенний вегетационные сезоны.

Ранее авторами настоящего исследования был проведен ряд изысканий, связанных с оценкой взаимосвязей в динамике климатических параметров и вегетационных индексов на примере территории Республики Коми [Bobkov et al., 2015; Panidi et al., 2016; Panidi, Tsepelev, 2017]. Была предложена методика определения границ трех вегетационных сезонов на основе анализа графиков годового хода нормализованного разностного водного индекса (Normalized Difference Water Index – NDWI). Предложенная методика позволяет выполнять оценку границ сезонов на основе сеточных карт вегетационного индекса попиксельно, получая таким образом картину пространственного распределения дат вегетационных сезонов. Предварительно выявлена согласованность годового хода NDWI со средними многолетними границами вегетационных сезонов [Panidi et al., 2016], для метеорологической станции Сыктывкар данные представлены на рис. 1. Настоящая работа, в свою очередь, посвящена детализации анализа соответствия оценок границ вегетационных сезонов по спутниковым данным и по данным наземного мониторинга на метеорологических станциях.

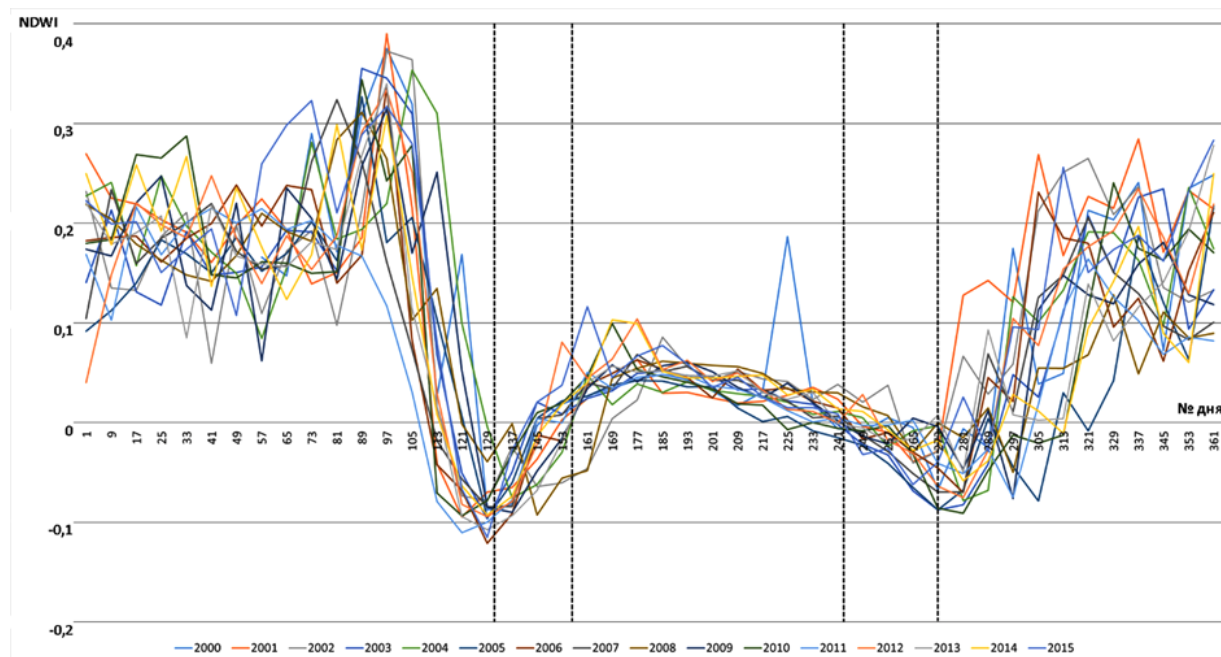


Рис. 1. Графики годового хода NDWI в 2000–2015 гг.;

Вертикальными линиями показаны осредненные границы вегетационных сезонов, определенные по данным наземных наблюдений, накопленных за указанный период

Fig. 1. Annual graphs of the surface air temperature for 2000–2015;

Vertical lines show the averaged frames of the growing seasons defined by the ground observations collected during mentioned period

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

NDWI рассчитывается на основе коэффициентов спектральной яркости поверхности в ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной областях электромагнитного спектра. Из литературных источников известно несколько вариантов (вычислительных формул) NDWI [Sekhon et al., 2010], различающихся в части выбора длины волны, принимаемой за коротковолновое инфракрасное излучение. В настоящем исследовании NDWI рассчитывался на основе коэффициентов спектральной яркости для длин волн 0,86 μm и 1,24 μm . Данный индекс чувствителен к сезонным изменениям количества воды в жидкой фазе в тканях растений. Оригинальная вычислительная формула предложена [Gao, 1996]:

$$NDWI = \frac{\rho_{0.86} - \rho_{1.24}}{\rho_{0.86} + \rho_{1.24}}, \quad (1)$$

где $\rho_{0.86}$ – коэффициент спектральной яркости для ближней инфракрасной области спектра; $\rho_{1.24}$ – коэффициент спектральной яркости для коротковолновой инфракрасной области спектра.

Индекс рассчитывался на основе материалов спутниковой съемки MODIS. Использованы 8-дневные композиты коэффициентов спектральной яркости, полученные из архива LP DAAC – продукт MOD09A1¹. Значения индекса рассчитывались на основе каналов № 2 (0,841–0,876 μm) и 5 (1,230–1,250 μm). Процедура расчета автоматизирована с использованием инструмента ModelBuilder в среде ArcGIS for Desktop.

В качестве данных наблюдений приземной температуры воздуха использованы находящиеся в открытом доступе массивы данных РОСГИДРОМЕТА².

¹ https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod09a1_v006

² <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении ранее выполненных исследований были собраны и обобщены данные по NDWI, осредненные по 8 дней (представленные в форме восьмидневных композитов). На основе указанных данных рассчитаны графики годового хода индекса для метеорологических станций, расположенных в пределах Республики Коми. При построении графиков выполнялось осреднение значений индекса в радиусе 10 км вокруг метеорологических станций.

На текущем этапе исследований, для оценки согласованности определений границ вегетационных сезонов по спутниковым и наземным данным дополнительно построены графики годового хода приземной температуры воздуха по данным метеорологических станций. На рис. 2–6 представлены графики среднесуточной температуры для метеорологической станции Сыктывкар.

На основе рядов данных, представленных на графиках, выполнено определение границ вегетационных сезонов (отдельно по данным наблюдений температуры и отдельно по данным NDWI). Границы сезонов обозначены на графиках вертикальными линиями. Определение границ сезонов по данным наблюдений температуры выполнено с использованием метода Педя. Границы полного вегетационного сезона по данным NDWI определялись как абсолютные весенний и осенний минимумы на графиках годового хода. Границы летнего вегетационного сезона по данным NDWI определялись как точки пересечения графика NDWI за полный вегетационный сезон и линейного тренда данного графика (см. рис. 2–6). Полученные границы и продолжительность вегетационных сезонов приведены в табл. 1–3. В табл. 4 дополнительно приведены границы и продолжительность вегетационных сезонов, рассчитанные по данным наблюдений приземной температуры воздуха и NDWI, осредненных за период с 2011 по 2015 гг.

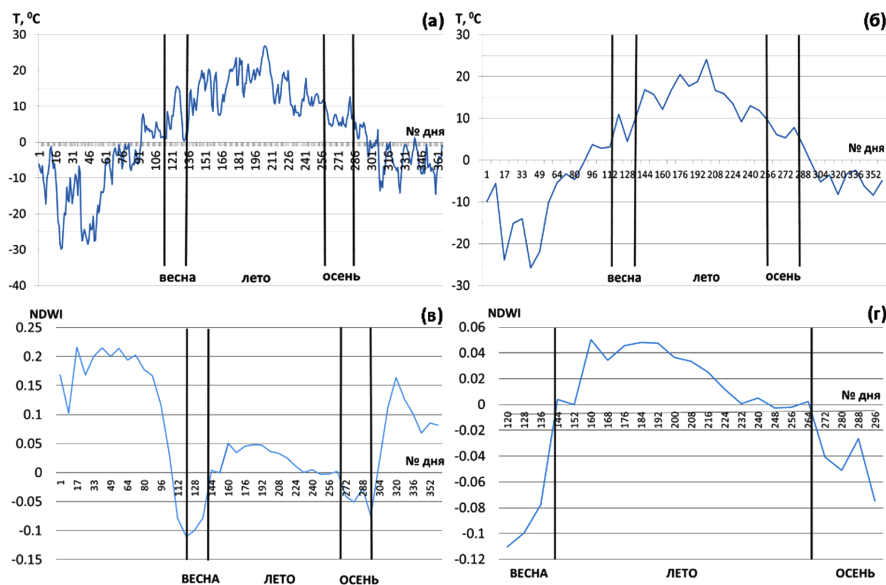


Рис. 2. Графики годового хода приземной температуры воздуха для 2011 г. – среднесуточные значения (а) и значения, осредненные за 8 дней (б); График годового хода NDWI в 2011 г. (в); График NDWI для полного вегетационного сезона 2011 г. (г); Вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов, определённые по данным графикам Fig. 2. Annual graphs of the surface air temperature for 2011 – 1-day averaged values (a) and 8-day averaged values (б); Annual graph of the NDWI for 2011 (в); NDWI graph for the full growing season of 2011 (г); Vertical lines show the frames of the growing seasons defined by the graphs

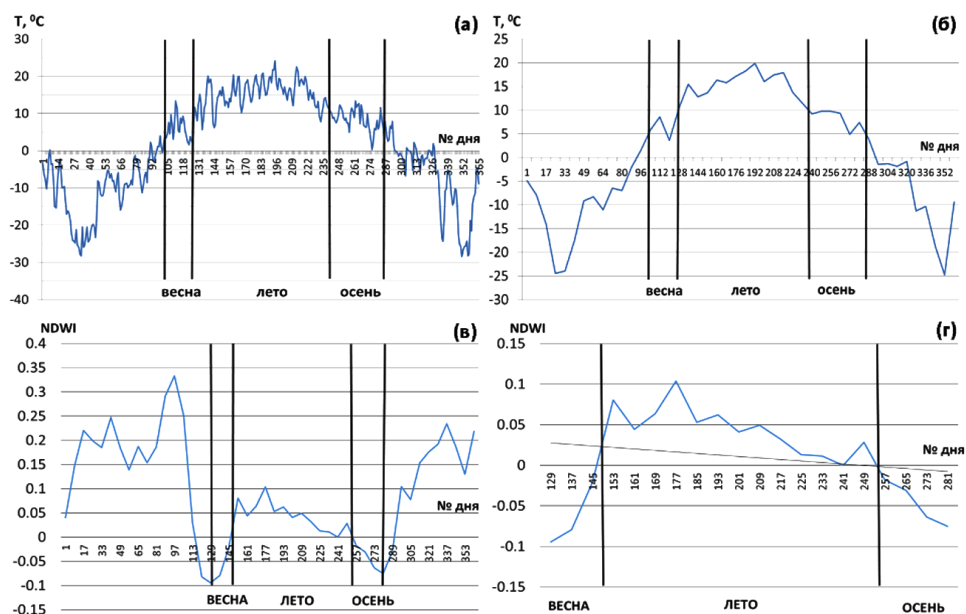


Рис. 3. Графики годового хода приземной температуры воздуха для 2012 г. – среднесуточные значения (а) и значения, осредненные за 8 дней (б); График годового хода NDWI в 2012 г. (в); График NDWI для полного вегетационного сезона 2012 г. (г); Вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов, определенные по данным графикам

Fig. 3. Annual graphs of the surface air temperature for 2012 – 1-day averaged values (а) and 8-day averaged values (б); Annual graph of the NDWI for 2012 (в); NDWI graph for the full growing season of 2012 (г); Vertical lines show the frames of the growing seasons defined by the graphs

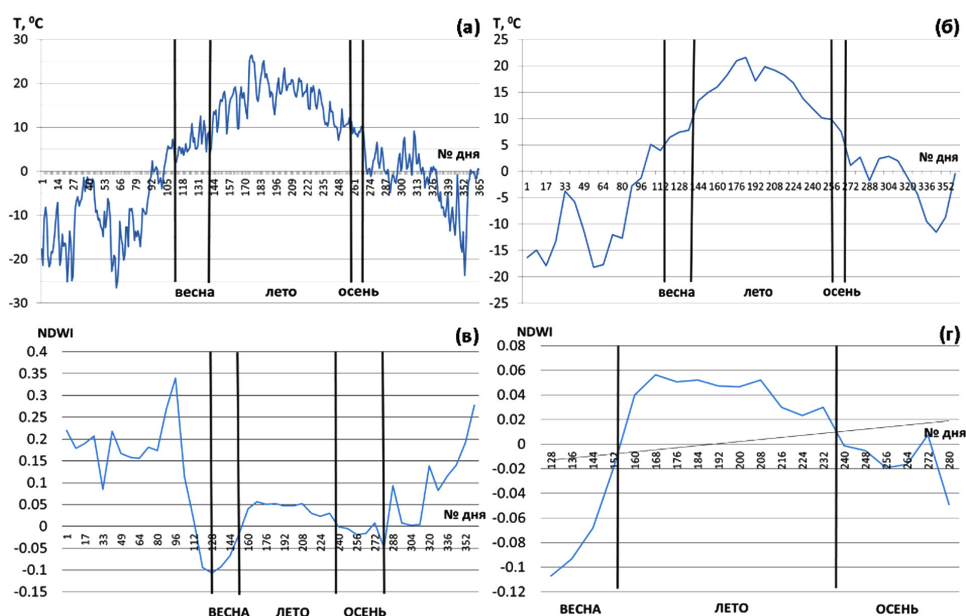


Рис. 4. Графики годового хода приземной температуры воздуха для 2013 г. – среднесуточные значения (а) и значения, осредненные за 8 дней (б); График годового хода NDWI в 2013 г. (в); График NDWI для полного вегетационного сезона 2013 г. (г); Вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов, определенные по данным графикам

Fig. 4. Annual graphs of the surface air temperature for 2013 – 1-day averaged values (а) and 8-day averaged values (б); Annual graph of the NDWI for 2013 (в); NDWI graph for the full growing season of 2013 (г); Vertical lines show the frames of the growing seasons defined by the graphs

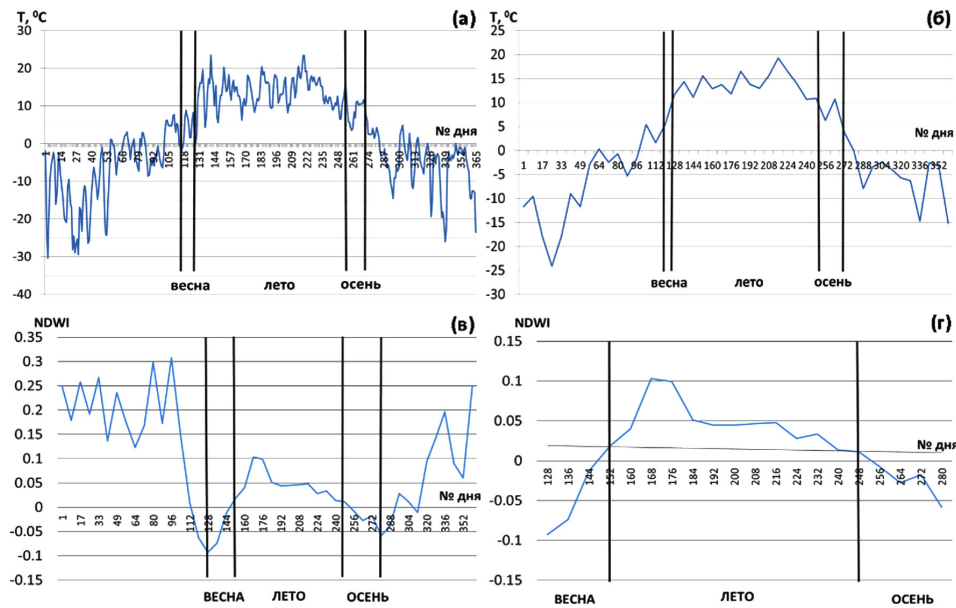


Рис. 5. Графики годового хода приземной температуры воздуха для 2014 г. – среднесуточные значения (а) и значения, осредненные за 8 дней (б); График годового хода NDWI в 2014 г. (в); График NDWI для полного вегетационного сезона 2014 г. (г); Вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов, определённые по данным графикам Fig. 5. Annual graphs of the surface air temperature for 2014 – 1-day averaged values (а) and 8-day averaged values (б); Annual graph of the NDWI for 2014 (в); NDWI graph for the full growing season of 2014 (г); Vertical lines show the frames of the growing seasons defined by the graphs

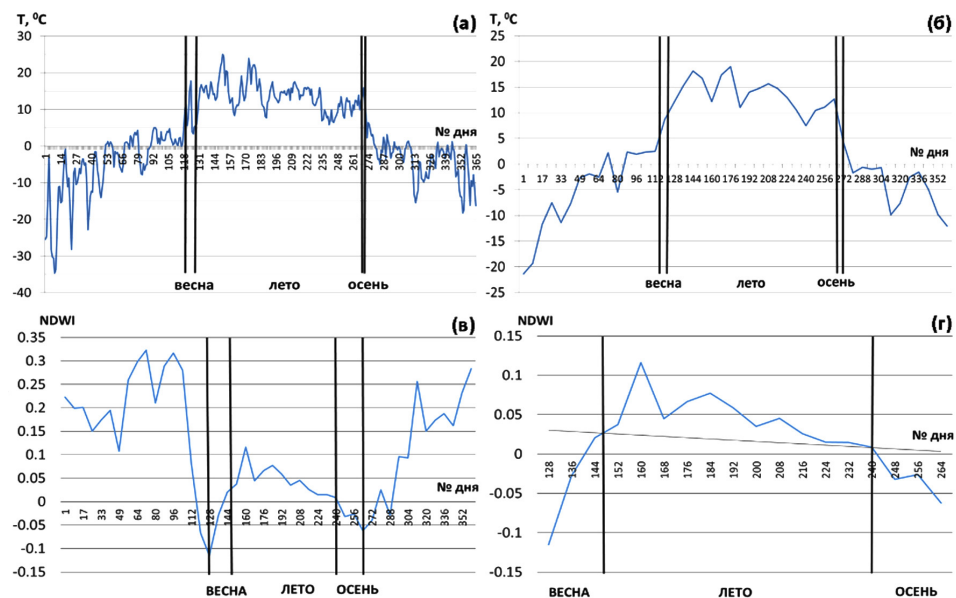


Рис. 6. Графики годового хода приземной температуры воздуха для 2015 г. – среднесуточные значения (а) и значения, осредненные за 8 дней (б); График годового хода NDWI в 2015 г. (в); График NDWI для полного вегетационного сезона 2015 г. (г); Вертикальными линиями показаны границы вегетационных сезонов, определённые по данным графикам Fig. 6. Annual graphs of the surface air temperature for 2015 – 1-day averaged values (а) and 8-day averaged values (б); Annual graph of the NDWI for 2015 (в); NDWI graph for the full growing season of 2015 (г); Vertical lines show the frames of the growing seasons defined by the graphs

Таблица 1. Границы вегетационных сезонов в 2011–2015 гг., определенные по данным среднесуточной приземной температуры воздуха

Table 1. Growing season frames for 2011–2015, defined using 1-day averaged data of surface air temperature

Начало весеннего сезона	Окончание весеннего сезона	Число дней	Начало летнего сезона	Окончание летнего сезона	Число дней	Начало осеннего сезона	Окончание осеннего сезона	Число дней
27.04.2011 (день 117)	16.05.2011 (день 136)	20	17.05.2011 (день 137)	16.09.2011 (день 259)	123	17.09.2011 (день 260)	14.10.2011 (день 287)	28
15.04.2012 (день 106)	06.05.2012 (день 127)	22	07.05.2012 (день 128)	29.08.2012 (день 242)	115	30.08.2012 (день 243)	13.10.2012 (день 287)	45
25.04.2013 (день 115)	22.05.2013 (день 142)	28	23.05.2013 (день 143)	16.09.2013 (день 259)	117	17.09.2013 (день 260)	26.09.2013 (день 269)	10
29.04.2014 (день 119)	09.05.2014 (день 129)	11	10.05.2014 (день 130)	13.09.2014 (день 256)	127	14.09.2014 (день 257)	30.09.2014 (день 273)	17
29.04.2014 (день 119)	10.05.2015 (день 130)	12	11.05.2015 (день 131)	28.09.2015 (день 271)	141	29.09.2015 (день 272)	02.10.2015 (день 275)	4

Таблица 2. Границы вегетационных сезонов в 2011–2015 гг., определенные по данным осредненной по 8 дней приземной температуры воздуха

Table 2. Growing season frames for 2011–2015, defined using 8-day averaged data of surface air temperature

Начало весеннего сезона	Окончание весеннего сезона	Число дней	Начало летнего сезона	Окончание летнего сезона	Число дней	Начало осеннего сезона	Окончание осеннего сезона	Число дней
22.04.2011 (день 114)	15.05.2011 (день 135)	22	16.05.2011 (день 136)	11.09.2011 (день 254)	119	12.09.2011 (день 255)	11.10.2011 (день 284)	30
12.04.2012 (день 102)	10.05.2012 (день 130)	29	11.05.2012 (день 131)	26.08.2012 (день 238)	108	27.08.2012 (день 239)	16.10.2012 (день 290)	52
30.04.2013 (день 120)	24.05.2013 (день 144)	25	25.05.2013 (день 145)	17.09.2013 (день 260)	116	18.09.2013 (день 261)	29.09.2013 (день 272)	12
01.05.2014 (день 121)	09.05.2014 (день 129)	9	10.05.2014 (день 130)	12.09.2014 (день 255)	126	13.09.2014 (день 256)	01.10.2014 (день 274)	19
30.04.2015 (день 120)	08.05.2015 (день 128)	9	09.05.2015 (день 129)	21.09.2015 (день 264)	136	22.09.2015 (день 265)	29.09.2015 (день 272)	8

При анализе полученных данных обращает на себя внимание хорошая согласованность (в основном разница составляет менее 8 дней – периода осреднения NDWI) границ полного вегетационного сезона, рассчитанных на основе многолетних рядов наблюдений (данные осреднены за 15 лет), запаздывание дат смены сезонов, определенных по NDWI, по сравнению с датами, определенными на основе наблюдений температуры, а также в ряде случаев сокращение продолжительности летнего сезона и увеличение осеннего и весеннего, определенных по данным NDWI, по сравнению с определенными на основе наблюдений температуры.

Таблица 3. Границы вегетационных сезонов в 2011–2015 гг., определенные по данным осредненных по 8 дней значений NDWI

Table 3. Growing season frames for 2011–2015, defined using 8-day averaged NDWI values

Начало весеннего сезона	Окончание весеннего сезона	Число дней	Начало летнего сезона	Окончание летнего сезона	Число дней	Начало осеннего сезона	Окончание осеннего сезона	Число дней
01.05.2011 (день 121)	23.05.2011 (день 143)	23	24.05.2011 (день 144)	20.09.2011 (день 263)	120	21.09.2011 (день 264)	24.10.2011 (день 297)	34
08.05.2012 (день 129)	27.05.2012 (день 148)	20	28.05.2012 (день 149)	10.09.2012 (день 254)	106	11.09.2012 (день 255)	07.10.2012 (день 281)	27
09.05.2013 (день 129)	01.06.2013 (день 152)	24	02.06.2013 (день 153)	24.08.2013 (день 236)	84	25.08.2013 (день 237)	08.10.2013 (день 281)	45
09.05.2014 (день 129)	31.05.2014 (день 151)	23	01.06.2014 (день 152)	04.09.2014 (день 247)	96	05.09.2014 (день 248)	08.10.2014 (день 281)	34
09.05.2015 (день 129)	25.05.2015 (день 146)	18	26.05.2015 (день 146)	27.08.2015 (день 239)	94	28.08.2015 (день 240)	22.09.2015 (день 265)	26

Таблица 4. Границы вегетационных сезонов, определенные по данным среднесуточной приземной температуры воздуха, осредненным за период 2001–2015 гг. (а) и по данным 8-дневных значений NDWI, осредненным за период 2001–2015 гг. (б)

Table 4. Growing season frames defined using surface air temperature averaged averaged for the period of 2001–2015 (a) and NDWI values averaged for the period of 2001–2015 (б)

	Начало весеннего сезона	Окончание весеннего сезона	Число дней	Начало летнего сезона	Окончание летнего сезона	Число дней	Начало осеннего сезона	Окончание осеннего сезона	Число дней
(а)	30 апреля (день 120)	16 мая (день 136)	17	17 мая (день 137)	9 сентября (день 252)	116	10 сентября (день 253)	30 сентября (день 273)	21
(б)	8 мая (день 128)	1 июня (день 152)	25	2 июня (день 153)	27 августа (день 239)	87	28 августа (день 240)	29 сентября (день 272)	33

Последняя особенность требует дополнительных исследований и привлечения более продолжительных рядов наблюдений. Что же касается первых двух, необходимо отметить, что предварительно оцененная на предыдущих этапах исследований согласованность средних многолетних границ вегетационных сезонов, определяемых по наземным наблюдениям температуры воздуха и по данным NDWI, вновь обработанными данными подтверждается. Запаздывание же дат смены вегетационных сезонов, выявленных по данным NDWI, по сравнению с выявленными по данным наблюдений температуры воздуха, вероятно, может быть объяснено инертностью растительного покрова и запаздыванием отклика на изменение температуры воздуха. Хорошим примером является 2011 г., на температурных графиках которого просматриваются продолжительные колебания значений температуры воздуха вокруг пороговых значений, как весной, так и осенью. При этом все границы сезонов 2011 г., выявленные по NDWI, заметно смещены по времени. Подобные смещения дат, по предварительным оценкам, выглядят обоснованными, и позволяют сделать предварительное заключение о, вероятно, более точном соответствии смены вегетационных сезонов, определяемой по данным NDWI, смене вегетационных фаз растительного покрова.

ВЫВОДЫ

Преимущество применения данных ДЗЗ состоит во временном и пространственном разрешении, а также в величине охвата территории изучения, так как плотность гидрометеорологической сети в некоторых регионах мала, что не позволяет изучать динамику изменения климата с высокой дискретностью и точностью. При использовании спутниковых съемок, кроме того, появляется возможность оценивать пространственное распределение и пространственно-временную динамику дат смены и продолжительности вегетационных сезонов, представляя оценки в форме карт.

Приведенные в настоящей работе данные позволяют сделать предварительные выводы об обоснованности применения NDWI для оценки дат смены и продолжительности вегетационных сезонов, а также о более высоком соответствии оценок, выполненных подобным образом, динамике вегетационных фаз растительного покрова. Однако исследование требует продолжения, необходимы накопление и обработка более продолжительных рядов данных, и выполнение более представительных статистических оценок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и РГО, проект № 17-05-41118 РГО_a.

Данные MOD09A1 V006 получены с помощью онлайн-версии программного обеспечения LP DAAC2Disk download manager из онлайн-архива NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, https://lpdaac.usgs.gov/data_access/daac2disk.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the joint project of Russian Foundation of Basic Research and Russian Geographical Society, No 17-05-41118 RGO_a.

The MOD09A1 V006 dataset was retrieved from the online LP DAAC2Disk download manager, courtesy of the NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, https://lpdaac.usgs.gov/data_access/daac2disk.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведева М.А., Барталёв С.А., Лунян Е.А., Матвеев А.М., Толпин В.А., Пойда А.А. Возможности оценки момента наступления вегетационного сезона на основе спутниковых и метеорологических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 313–321.
2. Педь Д.А. Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения // Метеорология и гидрология. 1951. № 10. С. 38–39.
3. Семенова І.Г. Синоптичні та кліматичні умови формування посушливих явищ в Україні. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора географічних наук. 2015. 296 с. (на украинском языке).
4. Скрынник О.А., Сніжко С.І. Задача визначення дати стійкого переходу приземної температури повітря через певне фіксоване значення (аналіз методів) // Український гідрометеорологічний журнал. 2008. № 3. С. 56–66 (на украинском языке).
5. Скрынник О.Я., Скрынник О.А. Климатологический метод определения даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через заданное пороговое значение // Метеорология и гидрология. 2009. № 10. С. 90–99.
6. Справочник по климату СССР. Вып. 1. Архангельская и Вологодская области, Карельская и Коми АССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометиздат, 1968. 360 с.

7. Bobkov A., Panidi E., Torlopova N., Tsepelev V. NDVI Dynamics of The Taiga Zone in Connection with Modern Climate Changes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. V. XL-7/W3. P. 157–163. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-157-2015.
8. Delbart N.J-P., Kergoats L., Le Toan T., Lhermitte J., Picard G. Determination of Phenological Dates in Boreal Regions Using Normalized Difference Water Index. *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 97(1). P. 26–38. DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.011.
9. Gao B.C. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*. 1996. V. 58(3). P. 257–266.
10. Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.P., Randerson J.T., Houghton R.A. Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Environmental Research Letters*. 2007. V. 2, No 4. 045031. 9 p. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045031.
11. Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming // *Journal of Environmental Monitoring*. 2009. No 11. P. 2231–2238.
12. Panidi E., Tsepelev V. NDWI-based Technique for Detection of Change Dates of the Growing Seasons in Russian Subarctic. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. V. XLII-3/W2. P. 179–182. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-179-2017.
13. Panidi E., Tsepelev V., Torlopova N., Bobkov A. Mapping of the Land Cover Spatiotemporal Characteristics in Northern Russia Caused by Climate Change. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. V. XLI-B8. P. 997–1002. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-997-2016.
14. Sekhon N.S., Hassan Q.K., Sleep R.W. A Remote Sensing Based System to Predict Early Spring Phenology Over Boreal Forest // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2010. V. XXXVIII. Part 1. 5 p.
15. Stow D.A., Hopea A., McGuire D., Verbylac D., Gamond J., Huemmrich F., Houston S., Racine C., Sturm M., Tapeh K., Hinzman L., Yoshikawa K., Tweedie C., Noylek B., Silapaswan C., Douglas D., Griffith B., Jiao G., Epstein H., Walker D., Daeschner S., Petersen A., Zhou L., Myneni R. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 2004. No 89. P. 281–308.

REFERENCES

1. Bobkov A., Panidi E., Torlopova N., Tsepelev V. NDVI Dynamics of The Taiga Zone in Connection with Modern Climate Changes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. V. XL-7/W3. P. 157–163. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-157-2015.
2. Delbart N.J-P., Kergoats L., Le Toan T., Lhermitte J., Picard G. Determination of Phenological Dates in Boreal Regions Using Normalized Difference Water Index. *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 97(1). P. 26–38. DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.011.
3. Gao B.C. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*. 1996. V. 58(3). P. 257–266.
4. Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.P., Randerson J.T., Houghton R.A. Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Environmental Research Letters*. 2007. V. 2, No 4. 045031. 9 p. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045031.
5. Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming. *Journal of Environmental Monitoring*. 2009. No 11. P. 2231–2238.

6. *Medvedeva M.A., Bartalev S.A., Lupyan E.A., Matveev A.M., Tolpin V.A., Poida A.A.* The possibility of estimation of the growing season onset on the basing on satellite and meteorological data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2008. V. 5, issue 2. P. 313–321 (in Russian).
7. *Panidi E., Tsepelev V.* NDWI-based Technique for Detection of Change Dates of the Growing Seasons in Russian Subarctic. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. V. XLII-3/W2. P. 179–182. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLII-3-W2-179-2017.
8. *Panidi E., Tsepelev V., Torlopova N., Bobkov A.* Mapping of the Land Cover Spatiotemporal Characteristics in Northern Russia Caused by Climate Change. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. V. XLI-B8. P. 997–1002. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-997-2016.
9. *Ped' D.A.* About determination of dates of steady air temperature transition through certain values. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1951. No 10. P. 38–39 (in Russian).
10. *Sekhon N.S., Hassan Q.K., Sleep R.W.* A Remote Sensing Based System to Predict Early Spring Phenology Over Boreal Forest. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2010. V. XXXVIII. Part 1. 5 p.
11. *Semenova I.G.* Synoptic and Climatic Conditions of Formation of Arid Phenomena in Ukraine. Doctoral thesis. 2015. 296 p. (in Ukrainian).
12. *Stow D.A., Hopea A., McGuire D., Verbylac D., Gamond J., Huemmrich F., Houston S., Racinef C., Sturm M., Tapeh K., Hinzman L., Yoshikawai K., Tweedie C., Noylek B., Silapaswanl C., Douglasm D., Griftn B., Jiao G., Epsteino H., Walkerp D., Daeschnera S., Petersena A., Zhouq L., Myneni R.* Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 2004. No 89. P. 281–308.
13. *Skrynyk O.A., Snizhko S.I.* The issue of determining of the surface air temperature stable transition dates through a certain fixed value (analysis of methods). *Ukrai'ns'kyj gidrometeorologichnyj zhurnal*. 2008. No 3. P. 56–66 (in Ukrainian).
14. *Skrynnik O.Ya., Skrynnik O.A.* Climatological method for determining of the date of average daily air temperature steady transition through a given threshold. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2009. No. 10. P. 90–99 (in Russian).
15. *USSR climate reference book, issue 1. Arkhangelsk and Vologda regions, Karelian and Komi ASSR. Part. 2. air and soil temperature. L.: Gidrometeoizdat, 1968. 360 p. (in Russian).*

Сидорина И.Е.¹, Позднякова Н.А.², Кружилина А.А.³, Поляков А.В.⁴

ПРИМЕНЕНИЕ ДЗЗ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ ДЛЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

АННОТАЦИЯ

За последние двадцать лет геоинформатика в России стала необходимым инструментом и неотъемлемой частью научных изысканий. Благодаря ее тесному взаимодействию с картографией образовалось новое научно-прикладное направление – геоинформационное картографирование (ГК). Методы пространственного анализа, применяемые в ГК и геоинформатике, вывели археологические исследования на новый уровень. Они развиваются в рамках одной из ветвей картографии – археологического картографирования.

Современная археологическая картография является не только способом отображения находок и исторических событий, но и представляет собой один из методов научного исследования.

Сотрудники кафедры картографии и геоинформатики СПбГУ и Института истории материальной культуры РАН несколько лет ведут совместную работу по дешифрированию и каталогизации археологических памятников эпохи неолита на территории Среднего Енисея (Минусинские котловины) с использованием данных ДЗЗ. Ведется работа по составлению каталога и обнаружению археологических объектов в районе Среднего Енисея. Последние два года появилась возможность использовать новые данные – снимки, сделанные с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Применение БПЛА открыло огромные возможности для дешифрирования археологических памятников.

Применение данных ДЗЗ для геоинформационного картографирования археологических объектов – научное направление, которое именно сейчас активно развивается благодаря технологическим возможностям: снимкам с высоким разрешением и программам, позволяющим проводить обработку полученных пространственных данных. Важно автоматизировать процесс обнаружения и дешифрирования, разработать унифицированную систему условных обозначений для археологических карт, каталогизировать памятники. Нельзя забывать и о том, что грамотная визуализация и проведение геоинформационного анализа данных позволят выявлять закономерности в размещении археологических объектов, моделировать исторические процессы и явления, выдвигать новые гипотезы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационное картографирование, археология, ГИС, космический снимок, дистанционное зондирование Земли, БПЛА.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., д. 7–9, 199034, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail:* innablank@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., д. 7–9, 199034, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail:* qlnat@mail.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., д. 7–9, 199034, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail:* nastyakruga@yandex.ru

⁴ Институт истории материальной культуры РАН, Дворцовая наб., 18, 191186, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail:* poliakov@yandex.ru

**Inessa E. Sidorina¹, Natalia A. Pozdnyakova²,
Anastasia A. Kruzhilina³, Andrey V. Polyakov⁴**

APPLICATION OF DATA OF LAND REMOTE SENSING IN GIS FOR ARCHAEOLOGICAL RESEARCHES

Over the past twenty years, geoinformatics in Russia has become a necessary tool and an essential part of scientific research. Because of its close interaction with cartography, a new applied scientific direction – geoinformation mapping (GM) – was formed. The methods of spatial analysis used in the GM and geoinformatics raised archaeological research to a new level. They develop within the framework of one of the cartography branches – archaeological mapping.

Modern archaeological cartography is not only a way of displaying findings and historical events, but also is one of the methods of scientific research.

The Department of Cartography and Geoinformatics of St. Petersburg State University and the Institute of the History of Material Culture of the Russian Academy of Sciences have been working together for several years on deciphering and cataloging Neolithic archaeological sites in the Middle Yenisei (Minusinsk hollows) using remote sensing data. Work is underway to compile a catalogue and discover archaeological sites in the area of the Middle Yenisei. The last two years, it became possible to use new data – images taken with an unmanned aerial vehicle (UAV). The use of UAVs opened huge opportunities for deciphering of archaeological sites.

The application of remote sensing data for geoinformation mapping of archaeological sites is a scientific area that is actively developing now, thanks to technological capabilities: high resolution imagery and programs that allow processing of spatial data. It is important to automate the process of detection and deciphering, to develop a unified system of symbols for archaeological maps, to catalogue monuments. We should not forget that reasonable visualization and geoinformation analysis of the data will allow us to reveal regularities in the location of archaeological objects, to model historical processes and phenomena, to put forward new hypotheses.

KEYWORDS: geoinformation mapping, archeology, GIS, space image, land remote sensing, UAV.

ВВЕДЕНИЕ

За последние двадцать лет геоинформатика в России стала необходимым инструментом и неотъемлемой частью научных изысканий. Благодаря ее тесному взаимодействию с картографией образовалось новое научно-прикладное направление – геоинформационное картографирование (ГК). Если опираться на определение И.К. Лурье, то ГК – это программно-управляемое создание и использование карт на основе ГИС и баз картографических данных и знаний. ГК – отрасль картографии, его суть составляет информационно-картографическое моделирование геосистем [Лурье, 2010]. Произошла интеграция картографии, геоинформатики и дистанционного зондирования, что существенно расширило возможности для научных изысканий разных направлений.

¹ Saint Petersburg State University, Universitetskaya nab. str., 7–9, 199034, Saint Petersburg, Russia, *e-mail:* innablank@mail.ru

² Saint Petersburg State University, Universitetskaya nab. str., 7–9, 199034, Saint Petersburg, Russia, *e-mail:* qlnat@mail.ru

³ Saint Petersburg State University, Universitetskaya nab. str., 7–9, 199034, Saint Petersburg, Russia, *e-mail:* nastyakruga@yandex.ru

⁴ Institute for the History of Material Culture, Russian Academy of Sciences, Dvotsovaya nab. str., 18, 191186, Saint Petersburg, Russia, *e-mail:* poliakov@yandex.ru

Методы пространственного анализа, применяемые в ГИС и геоинформатике, вывели археологические исследования на новый уровень. Они развиваются в рамках одной из ветвей картографии – археологического картографирования.

Работы по созданию информационного обеспечения для решения задач поиска, охраны, изучения и возможного использования археологических памятников выполняются в России с первой половины XIX в. Первая работа представляла собой карту, на которой отображались данные об известных на тот момент древних поселениях и объектах, носящих характер культурно-археологических памятников. Со второй половины XIX в. стали появляться первые методические основы археологического картографирования. В 1874 г. конгресс историков в Стокгольме утвердил для них международные знаки. В 1884 г. в России вышла работа Д.Н. Анучина, посвященная составлению легенд для археологической карты России.

В настоящее время не существует разработанной методики составления археологических карт, как и нет устоявшегося определения о том, что считается археологической картой. Современная археологическая картография является не только способом отображения находок и исторических событий, но и представляет собой один из методов научного исследования.

Советский археолог, автор многочисленных трудов по археологии Европы и СССР, Александр Львович Монгайт, дал определение археологическому картографированию как географическому методу изображения и изучения исторического процесса в пространстве с использованием археологических данных. Он выделял три задачи археологической картографии [Монгайт, 1962]:

1. Визуализация размещения археологических памятников и исторических событий на земной поверхности. Решением данной задачи является создание обзорной научно-справочной карты, которая служит основой для создания гипотез и дальнейших археологических исследований.
2. Благодаря археологической карте делаются обобщения и выводы по вопросам общественной жизни древних людей. Например, изучаются размещения древних поселений, возможные перемещения и взаимосвязи этнических групп; определяются возможные торговые пути и экономические связи между поселениями и т. д.
3. С помощью археологической карты моделируются и изучаются взаимосвязи общественных явлений прошлого с природными условиями тех времен.

Эти задачи актуальны и в рамках геоинформационного археологического картографирования. Благодаря применению ГИС решаются проблемы точной локализации археологических памятников, организации археологических данных с целью поиска других археологических памятников. Существенным преимуществом применения геоинформационных систем является возможность одновременно обрабатывать пространственные, временные и тематические данные. Применяя методы ГИС-анализа, можно получить информацию об историческом прошлом путем его моделирования.

Первый опыт применения ГИС-технологий принадлежит британским и американским исследователям, которые выступили в этой темой на Симпозиуме международного общества доисторических и протоисторических наук в Денвере в 1985 г. С 90-х гг. XX в. геоинформатика активно применялась в зарубежных археологических исследованиях. В России подобные работы стали проводиться на 10 лет позднее.

В наше время использование аэрофотоснимков для археологических исследований по-прежнему актуально. Китайский исследователь Пэнг Лу с помощью исторического архива (около 700 снимков) обнаружил в Восточной провинции Хэнань скрытые линейные археологические объекты и предложил наиболее подходящие дешифровочные признаки [Peng Lu и др., 2017].

С 1957 г., с запуском СССР первого искусственного спутника Земли, начался период космической съемки в дистанционном зондировании.

На данный момент съемку Земли из космоса ведут более 50 оптико-электронных и радарных космических аппаратов, принадлежащих двум десяткам стран, в том числе спутники новейшего поколения. Космические аппараты ДЗЗ: Ресурс-ДК1; QUICKBIRD; IKONOS; GeoEye1; WorldView1; WorldView2; EROS; SPOT; IRS; LANDSAT; RADARSAT.

В настоящее время существуют разнообразные виды космической информации. Главным образом, это снимки во всех диапазонах спектра электромагнитных волн, используемых в современных дистанционных методах – видимом и ближнем инфракрасном, тепловом инфракрасном и радиодиапазоне (микроволновом и ультракоротковолновом). Космические методы являются удачным дополнением к традиционным наземным и аэрометодам. Они представляют основу для разработки универсальной системы поиска и наблюдения за состоянием археологических памятников, причем как ранее изученных, так и еще не исследованных.

Наиболее эффективно для современных археологических исследований комплексное применение различных методов. Российскими исследователями была разработана методика, включавшая в себя анализ крупномасштабных карт, современных космических снимков, магнитную и топографическую съемку на территории Юго-Восточного Крыма [Гаврилов и др., 2016]. Способ реконструкции истории землепользования, основанный на интеграции картографических данных, материалов дистанционного зондирования (снимки с КА Landsat-2, 3, 4, 5, 7 и Quick Bird-2) и оценок внутрипочвенного объема камней, предложенный Ф.Н. Лисецким, позволяет идентифицировать в полевых условиях старозалежные земли и датировать их [Лисецкий и др., 2016]. В исследовании кипрского ученого Атоса Агапиу использовались два различных метода дистанционного зондирования в области археологии (КА Landsat и данные DMSP-OLS Night Time Lights Time Series Version 4). В результате было идентифицировано порядка половины неолитических объектов на площади более 180 км² [Athos Agapiou, 2017]. Е.П. Крупочкиным (Алтайский ГУ) разработаны и опробованы методы компьютерного дешифрирования мультиспектральных космических снимков высокого разрешения для идентификации объектов археологии с помощью вегетационных индексов и синтезированных индексных изображений [Крупочкин, 2010].

Помимо фотоизображений эффективно используется радиолокационная съемка. Среди первых подобных исследований – изучение археологами в 1970–1980-х гг. низменностей п-ова Юкатан. Были использованы радиолокационные изображения заболоченных территорий и обнаружено огромное количество сетей сельскохозяйственных дренажных каналов, поднятых полей и обширных мощеных поверхностей. Это имело решающее значение в оценке сложности использования майя водно-болотных угодий, предполагавшей их высокий уровень организации [Derold, Holcomb, 2007].

В основе изучения природной среды космическими методами лежит дешифрирование снимков, которое основано на использовании зависимостей между параметрами географических объектов и их оптическими характеристиками.

К методам дешифрирования можно отнести: визуальное (традиционное), ручное, полуавтоматизированное и автоматизированное и т. д. Наиболее перспективным методом является автоматизированное дешифрирование с помощью специальных программных комплексов. К преимуществам компьютерного метода можно отнести возможность преобразования яркостей цифровых снимков для улучшения их восприятия, а также классификация по заданным признакам. Но так как возможности программных продуктов ограничены, есть необходимость и в ручном дешифрировании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Несколько лет назад сотрудники кафедры картографии и геоинформатики СПбГУ и Института истории материальной культуры РАН начали совместную работу по дешифрированию и каталогизации археологических памятников эпохи неолита на территорию Среднего Енисея (Минусинские котловины) с использованием данных ДЗЗ.

Минусинские котловины, уникальные по своим природно-климатическим условиям, расположены в среднем течении р. Енисей. С эпохи палеолита они были заселены различными народами, многие из которых сыграли огромную роль в истории Евразии. Изучение оставленных ими уникальных археологических памятников продолжается уже почти 300 лет, но обнаружена и зафиксирована только малая их часть.

Главным объектом данного исследования являются могильники, которые в свою очередь состоят из курганов. Курганы с земляными насыпями, высоко возвышающимися на поверхности, хорошо заметны на космических снимках высокого разрешения, и выявляются по прямым или косвенным визуальным признакам. Распаханные курганы можно выделить по пятнам округлой формы на пахоте. Курганы с каменно-земляными и каменными насыпями фиксируются по светло-зеленым пятнам с белесым оттенком. Курганы с каменными ящиками в гробницах, которые видны на поверхности, отличаются прямоугольниками светлого цвета с оттененными темными контурами. Грунтовые могильники можно распознать только по косвенному признаку – пятнам более темной растительности.

Минусинская котловина имеет на своей территории значительное количество археологических памятников афанасьевской культуры (первый этап эпохи металла степей Енисея (конец IV тыс. – начала II до н.э.)). По большей части памятники представлены могильниками, реже встречаются поселения. Представители этой культуры первыми в Южной Сибири стали сооружать курганы. Вокруг могил выкладывалась каменная ограда из плоских обломков каменных плит. Насыпи, если и есть, то очень невысокие. Обычно ограды расположены отдельно друг от друга. Могильники сильно различаются, могут включать в среднем до 15 курганов. Размеры – от 3 до 25 м.

У памятников окуневской культуры (археологическая культура скотоводов бронзового века южной Сибири (II тыс. до н. э.)) ограда четырехугольная и состоит из плит песчаника, поставленных на ребро. Размеры – от $2,5 \times 3$ м до 40×40 м. Чаще всего 12×12 м. Могильники чаще состоят из 1, реже из 4 курганов. Насыпи практически не видны.

Одной из основных задач картографирования, в том числе и геоинформационного, является разработка системы условных обозначений. В археологии до сих пор нет унифицированной общепринятой системы условных знаков для создания археологических карт. Для упрощения процесса распознавания и разработки единообразной системы условных обозначений археологических объектов, было решено разработать каталог археологических памятников на территорию Среднего Енисея. Аналогом является каталог для дешифрирования топографических объектов. [Альбом образцов топографического дешифрирования аэроснимков. Тр. ЦНИИГАиК. Вып 180. М., 1967].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Компания СКАНЭКС предоставила 7 снимков космических аппаратов Spot 5 и 6. Территориальный охват – северная и центральная часть Республики Хакасия. В качестве исходных данных были использованы: планы могильных сооружений и GPS координаты наиболее характерных памятников разных археологических культур.

В программном комплексе ENVI производилась обработка и извлечение полезной информации с космических снимков.

Методы извлечения информации при всем их многообразии сводились к двум основным:

1. Визуальному при работе как с фотоматериалами, так и с изображением на экране монитора;
2. Автоматизированному, осуществляемому преимущественно на персональных компьютерах, реже на специально предназначенных для этого приборах.

В ходе визуального дешифрирования осуществлялся подбор оптимальных параметров для отображения снимков. К улучшающим параметрам относились преобразования, основанные на изменениях **цвета, яркости и контрастности** изображения. В ходе автоматического способа была испробована попытка классификации изображений методами без учителя **IsoData** и **K-Means**.

Второй этап работы включал поиск и выделение археологических объектов. Обнаруженные археологические объекты по растровым данным и создание векторных объектов. В итоге было обнаружено 750 археологических памятников.

Наряду с космической съемкой производилась тестовая работа с аэрофотоснимками. Съемка производилась в целях археологических изысканий вдоль проектируемой железной дороги, соединяющей Красноярский край и Республику Тыва. Снимки покрывают узкую полосу шириной примерно 1 км и длиной 30 км, маршрут проходит вдоль р. Иджим, от места ее впадения в р. Ус и до пос. Маральский.

Как и в случае с космической съемкой, изначально проводилось визуальное дешифрирование, но уже без этапа улучшающих преобразований, что связано с высокой детальностью снимков.

Для каталога выбирались только эталонные объекты, которые являются характерными для определенной культуры (например, объекты афанасьевской и окуневской культуры).

Для занесения объекта в каталог была разработана следующая структура (рис. 1).

Фрагмент исходного изображения	Отдешифрированное изображение	Информация, полученная при анализе памятника
		Объект находится в районе Ермаковское, Красноярский край, на правом берегу реки Иджим. Координаты кургана 52°17'16,19"N, 93°22'56,29"E. Конструкция кургана прямоугольная, имеется насыпь, вокруг которой расположен ров.
		Объекты находятся в районе Ермаковское, Красноярский край, на правом берегу реки Иджим. Примерное местоположение курганов 52°17'12,94"N, 93°23'42,70"E. Цепь прямоугольных курганов СЗ-ЮВ направления, ограды и надмогильные конструкции не сохранились.
		Объекты находятся в районе Ермаковское, Красноярский край, на правом берегу реки Иджим. Примерное местоположение курганов 52°13'18,74"N, 93°33'59,61"E. Памятники круглые, с каменной насыпью.
		Объекты находятся в районе Ермаковское, Красноярский край, на правом берегу реки Иджим. Примерное местоположение курганов 52°13'09,87"N, 93°34'23,47"E. Памятники разных диаметров и конструкций.

Рис. 1. Каталог дешифрирования археологических памятников

Fig. 1. Catalogue photo-interpretation archaeological monument

К описательной информации относятся результаты визуального и инструментального анализа:

1. Местоположение памятника относительно крупных населенных пунктов или объектов гидрографии;
2. Координаты центра объекта в формате DD MM SS;
3. Диаметр или размеры стенок, в зависимости от формы сооружения;
4. Характерные особенности конструкции.

Космические снимки пока дают меньшую детализацию чем данные аэрофотосъемки. Работа по составлению каталога и обнаружению археологических объектов в районе Среднего Енисея продолжилась с появлением новых данных (снимков, сделанных с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА)).

Применение БПЛА открыло огромные возможности для дешифрирования археологических памятников. Аппараты бывают самолетного и вертолетного типов. Первые применяются в основном для создания ортофотопланов территорий, цифровых моделей местности, мониторинга протяженных объектов. Их преимущества включают высокую крейсерскую скорость, значительную дальность полета и автономность. БПЛА вертолетного типа используются для перспективной съемки, мониторинга небольших территорий, обследования сложных конструкций, лидарной съемки и построения 3D-моделей объектов. Основные преимущества: малые размеры, взлет и запуск с любых площадок, возможность зависания над определенным участком местности.

Поэтому данные аппараты активно стали использовать в археологических исследованиях. Например, изучая археологические памятники на Соловецких островах, А.А. Медведев применил съемку с БПЛА в оптическом и тепловом диапазонах, в ходе обработки результатов которой выявлено более 10 новых объектов [Medvedev et al., 2015].

Экспедиция Института истории материальной культуры РАН несколько лет работала над изучением могильника Нумахыр, расположенного в восточной части Усть-Абаканского района Республики Хакасия. На его территории в основном расположены объекты афанасьевской и окуневских культур. В 2015 г. была произведена аэрофотосъемка местности квадрокоптером DJI Phantom 3 Advanced, результаты которой и были обработаны на кафедре картографии и геоинформатики СПбГУ. Были использованы программные продукты: Agisoft Photoscan Professional, SAS. Planet, QGIS (рис. 2).

В свободно распространяемой программе SASPlanet, которая предназначен для просмотра и загрузки спутниковых снимков высокого разрешения и обычных карт, представляемых такими сервисами, как GoogleEarth, GoogleMaps, BingMaps, DigitalGlobe, «Космоснимки», Яндекс.карты, Yahoo! Maps поочередно загружались спутниковые данные на район исследования. И самым удачным вариантом стал снимок с сервиса Bing. С помощью данного снимка визуально идентифицировано 28 объектов афанасьевской культуры и 2 окуневской.

По снимкам БПЛА с помощью программного продукта Agisoft Photoscan Professional был построен ортофотоплан с пространственным разрешением 4 см. С применением улучшения визуализации, регулировки насыщенности цвета, визуально были идентифицированы археологические объекты.

Таким образом, в ходе нашего исследования выявлены курганы, найденные в 2000 г. Н.А. Боковенко, но не обнаруженные экспедицией А.В. Полякова, плюс к этому – 10 новых объектов (предположительно 7 афанасьевских курганов и 3 окуневских).

Лучше всего для идентификации памятников подходит ортофотоплан, имеющий высокое пространственное разрешение и позволяющий детально рассмотреть исследуемую территорию. Но использование бесплатных картографических сервисов (Google, Yandex,

Bing) может помочь в обнаружении новых объектов. В полевой сезон 2017 г., применив результаты дешифрирования, было подтверждено нахождение двух курганов афанасьевской культуры.

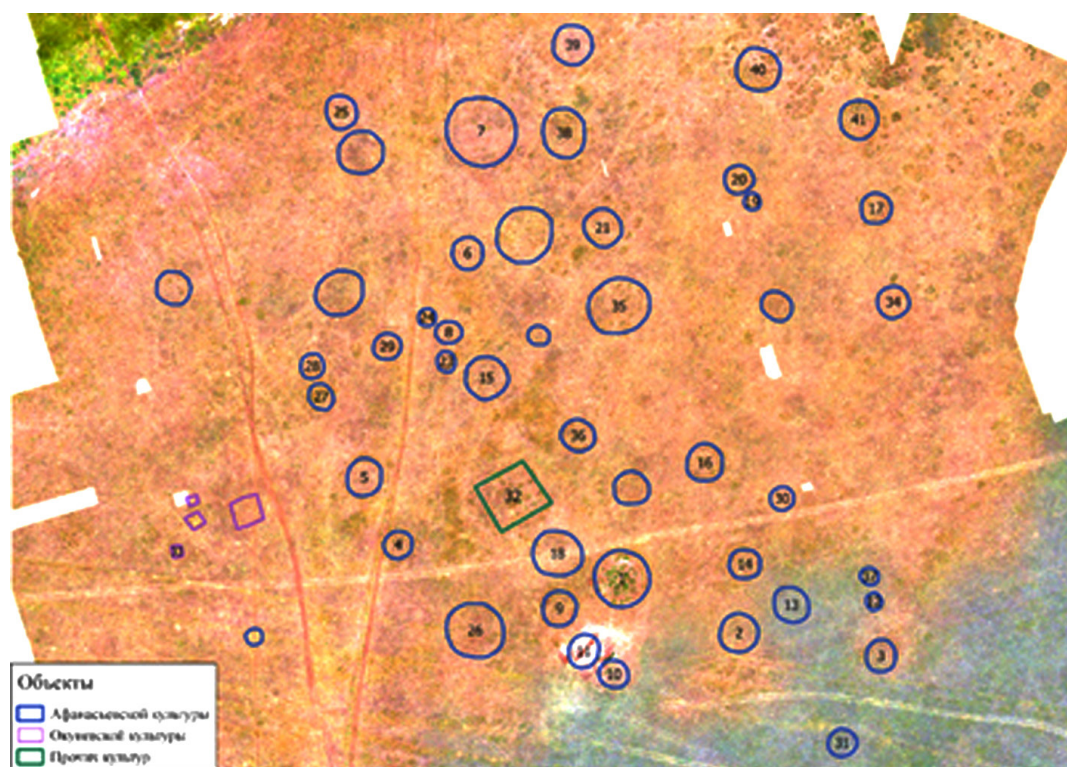


Рис. 2. Схема археологических памятников
в районе могильника Нумахыр на ортофотоплане
Fig. 2. The scheme of archaeological monuments near the Numakhyr
on the orthophotomap

Следующая задача, требующая внимания, – автоматизация процесса дешифрирования и идентификации курганов различных культур. Построение системы дешифрировочных признаков, которая позволяла бы однозначно идентифицировать археологические объекты. Сделать это только по данным оптического диапазона практически невозможно, так как по цвету ограды курганов практически не отличаются от типовых объектов местности. Необходимы дополнительные сведения: съемка в NIR (для последующего расчета NDVI) или тепловом диапазоне.

ВЫВОДЫ

Применение данных ДЗЗ для геоинформационного картографирования археологических объектов – научное направление, которое именно сейчас активно развивается благодаря технологическим возможностям: снимкам с высоким разрешением и программам, позволяющим проводить обработку полученных пространственных данных.

Важно автоматизировать процесс обнаружения и дешифрирования, разработать унифицированную систему условных обозначений для археологических карт, каталогизировать памятники. Нельзя забывать и о том, что грамотная визуализация и проведение геоинформационного анализа данных позволят выявлять закономерности в размещении археологических объектов, моделировать исторические процессы и явления, выдвигать новые гипотезы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акашева А.А.* Пространственный анализ данных в исторических науках. Применение геоинформационных технологий: Учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. 2011. 79 с.
2. *Афанасьев Г.Е., Савенко С.Н., Коробов Д.С.* Древности Кисловодской котловины. М.: Научный мир, 2004. 240 с.
3. *Багаутдинов Р.С.* Исследование возможности использования космических снимков для выявления археологических объектов / Р.С. Багаутдинов, В.Н. Копенков, В.Н. Мышкин, В.В. Сергеев, С.А. Трибунский // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 3. С. 439–444.
4. *Гаврилов А.В., Смекалова Т.Н., Беван Б.В., Гарипов А.С.* Дистанционные и геофизические исследования поселенческих памятников в степной части округа античной Феодосии // Вестник Российского Гуманитарного Научного Фонда. 2016. № 3–4(84–85). С. 29–46.
5. *Коробов Д.С.* Основы геоинформатики в археологии: Учебное пособие. М.: Изд-во Московского ун-та, 2011. 224 с.
6. *Крупочкин Е.П.* О новых возможностях дистанционного поиска археологических памятников по данным NDVI и результатам пространственной фильтрации мультиспектральных снимков // Известия Алтайского государственного университета. 2010. № 3–1. С. 105–115.
7. *Лисецкий Ф.Н., Маринина О.А., Терехин Э.А.* Опыт комплексного картографирования разновременных залежей на щебнистых почвах в сельской округе Керкинитиды // Проблемы истории, филологии, культуры. 2016. № 2. С. 227–246.
8. *Лурье И.К.* Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: Учебник. М.: КДУ, 2010. 424 с.
9. *Монгайт А.Л.* Задачи и возможности археологической картографии // Советская археология. 1962. № 1. С. 19–43.
10. *Орлов П.В., Татаурова Л.В., Лашев М.В.* Использование беспилотных летательных аппаратов и систем высокоточного спутникового позиционирования для построения трехмерных ландшафтных моделей археологических памятников // Виртуальная археология (неразрушающие методы исследований, моделирование, реконструкции): материалы Первой Междунар. конф. / Государственный Эрмитаж. СПб.: Изд-во Гос. Эрмитажа, 2013.
11. *Athos Agapiou.* Remote sensing gheritage in a petabyte-scale: satellite data and heritage Earth Engine applications // International Journal of Digital Earth. 2017. V. 10, No 1. P. 85–102.
12. *Derrold W. Holcomb, Irina LitaShingiray.* Imaging Radar in Archaeological Investigations: An Image Processing Perspective // James Wiseman, Farouk El-Baz. Remote Sensing in Archaeology (Interdisciplinary Contributions to Archaeology). Springer, 2007. 553 p.
13. *Medvedev A.A., Martinov A.Y., Kudikov A.V.* Remote sensing of the neolithic artifacts in the russian north // Proceedings of XXVII International Cartographic Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 23–28 August 2015. 2015.
14. *Peng Lu, Ruixia Yang, Panpan Chen, Yangshan Guo, Fulong Chen, Nicola Masini, Rosa Lasaponara.* On the use of historical archive of aerial photographs for the discovery and interpretation of ancient hidden linear cultural relics in the alluvial plain of eastern Henan, China // Journal of Cultural Heritage. Supplement, March, 2017. V. 23. P. 20–27.

REFERENCES

1. *Afanasyev G.E., Savenko S.N., Boxes D.S.* Antiquities of the Kislovodsk hollow. M.: Scientific world, 2004. 240 p. (in Russian).
2. *Akasheva A.A.* The space analysis of data in historical sciences. Use of geoinformational technologies: educational and methodical grant. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2011. 79 p. (in Russian).

3. *Athos Agapiou*. Remote sensing heritage in a petabyte-scale: satellite data and heritage Earth Engine applications International Journal of Digital Earth, 2017. V. 10, No 1. P. 85–102.
4. *Bagautdinov R.S.* Research of a possibility of use of space pictures for identification of archaeological objects R.S. Bagautdinov, V.N. Kopenkov, V.N. Myshkin, V.V. Sergeyev, S.A. Tribunsky. Computer optics. 2015. V. 39, No 3. P. 439–444 (in Russian).
5. *Derrold W. Holcomb, Irina LitaShingiray*. Imaging Radar in Archaeological Investigations: An Image Processing Perspective James Wiseman, Farouk El-Baz. Remote Sensing in Archaeology (Interdisciplinary Contributions to Archaeology. Springer, 2007. 553 p.
6. *Gavrilov A.V., Smekalova T.N., Bevan B.V.* Garipov Ampere-second. Distant and geophysical surveys of settlement monuments in a steppe part the district of antique Feodosiya the Bulletin of the Russian Humanitarian Scientific Fund, 2016. No 3–4(84–85). P. 29–46 (in Russian).
7. *Korobov D.S.* Fundamentals of geoinformatics in archeology: Manual. M.: Publishing house of the Moscow university, 2011. 224 p. (in Russian).
8. *Krupochkin E.P.* About new opportunities of distant searching of archaeological monuments according to NDVI and to results of space filtration of multispectral pictures News of the Altai state university, 2010. No 3–1. P. 105–115 (in Russian).
9. *Lisetsky F.N., Marinin O.A., Terekhin E.A.* Experience of complex mapping of deposits occurring at different times on the shchebnistykh soils in rural the District of Kerkinitidy Problemy of history, philology, culture. 2016. No 2. P. 227–246 (in Russian).
10. *Lurye I.K.* Geoinformational mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of space pictures: Textbook. M.: KDU, 2010. 424 p. (in Russian).
11. *Medvedev A.A., Martinov A.Y., Kudikov A.V.* Remote sensing of the neolithic artifacts in the russian north Proceedings of XXVII International Cartographic Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 23–28 August 2015. 2015.
12. *Mongayt A.L.* Tasks and possibilities of archaeological cartography. Soviet archeology. 1962. No 1. P. 19–43 (in Russian).
13. *Orlov P.V., Tataurova L.V., Lashev M.V.* Use of unmanned aerial vehicles and the systems of high-precision satellite positioning for creation of three-dimensional landscape models of archaeological monuments the Virtual archeology (non-destructive methods of researches, model operation, reconstruction): materials of the First International conference State Hermitage. SPb.: State publishing house. Hermitage, 2013 (in Russian).
14. *Peng Lu, Ruixia Yang, Panpan Chen, Yangshan Guo, Fulong Chen, Nicola Masini, Rosa Lasaponara.* On the use of historical archive of aerial photographs for the discovery and interpretation of ancient hidden linear cultural relics in the alluvial plain of eastern Henan, China Journal of Cultural Heritage. Supplement, March 2017. V. 23. P. 20–27.

Сутырина Е.Н.¹

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ AVHRR ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕРА БАЙКАЛ

АННОТАЦИЯ

Связь прозрачности воды с содержанием в ней растворенных и взвешенных веществ органического и неорганического происхождения позволяет отнести прозрачность к важнейшим физическим показателям качества воды. Для изучения распределения прозрачности в оз. Байкал с площадью акватории порядка 31,7 тыс. км² дистанционное зондирование является незаменимым инструментом. Поэтому цель данного исследования состояла в оценке и картировании пространственно-временного распределения условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал с использованием материалов дистанционного спутникового зондирования Земли. В рамках исследования на основании сопоставления массивов судовой и спутниковой информации были разработаны региональные методики определения величины условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным радиометра AVHRR. С использованием разработанных региональных алгоритмов были составлены серии картосхем распределения условной прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал, согласно которым за период с июня по октябрь в 1998–2017 гг. прозрачность воды в поверхностном слое озера в целом изменялась от менее чем 0,1 м в непосредственной близости от дельты р. Селенги, в заливах Провал и Посольский сор до более чем 27,5 м в глубоководных районах озера. Также изучена внутригодовая и межгодовая изменчивость средних значений прозрачности воды в поверхностном слое в пределах отдельных лимнических районов и всей акватории озера в целом и дана оценка основных особенностей пространственно-временного распределения прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал в безледоставный период.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оз. Байкал, условная прозрачность воды, дистанционное зондирование.

Ekaterina N. Sutyryna²

THE APPLICATION OF AVHRR DATA FOR THE STUDY OF HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS OF LAKE BAIKAL

ABSTRACT

The relationship between the water transparency and the content of dissolved and suspended organic and inorganic substances in it allows to regard the transparency as the one of the most important physical parameters of the water quality. Remote sensing is an indispensable tool to study the distribution of transparency of Lake Baikal with the surface area of 31.7 thousand km². Therefore, the aim of this study was to evaluate and map the spatiotemporal distribution of relative water transparency of the surface layer of Lake Baikal using Earth remote sensing data. Regional methods of determining the relative water transparency of the surface layer

¹ Иркутский государственный университет, Географический факультет, ул. Карла Маркса, д. 1, 664003, Иркутск, Россия, e-mail: ensut78@gmail.com

² Irkutsk State University, Geographical faculty, Karl Marx str., 1, 664003, Irkutsk, Russia, e-mail: ensut78@gmail.com

of Lake Baikal with AVHRR data was developed by matching ship and satellite information. Using the regional algorithms, a series of maps of relative transparency of the surface layer of Lake Baikal were developed, according to which it was investigated that during the period from June to October in 1998–2017 the water transparency of the surface layer of the lake range from less than 0.1 m in the immediate vicinity of the Selenga River delta, in the Gulf of Proval and Posolsky Sor, to more than 27.5 m in the deep-water areas of the lake. Interannual and interannual variability of average values of water transparency of the surface layer within some lacustrine areas and the entire water area of the lake was examined and the major features of the spatiotemporal distribution of transparency of the surface layer of Baikal Lake during an ice-free period was also estimated.

KEYWORDS: Lake Baikal, relative water transparency, remote sensing.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях меняющегося климата и возрастающего антропогенного воздействия на внутренние водоемы, в том числе в результате увеличения рекреационной нагрузки, актуальной становится проблема дистанционного контроля состояния данных водных объектов. Мониторинг и изучение экологически значимых гидрооптических характеристик водоемов, включая прозрачность воды, является одним из важных направлений региональной лимнологии [Суторихин и др., 2013]. Связь прозрачности с содержанием в воде взвешенных и растворенных веществ органического и неорганического происхождения относит прозрачность к важнейшим физическим показателям качества воды и позволяет использовать ее измерения для типизации озер и отдельных лимнических районов, идентификации водных масс различного генезиса, для косвенного метода анализа динамики вод и т. д. [Шерстянкин, 1974]. Для изучения особенностей распределения прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал, имеющего значительные размеры акватории в 31,7 тыс. км² [Troitskaya et al., 2015], привлечение данных дистанционного зондирования дает возможность следить за состоянием всего водоема, получать пространственно-временную информацию о лимнических процессах и изучать озеро как целостный географический объект, что сложно обеспечить с применением только судовых наблюдений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данного исследования для оценки прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал и изучения особенностей ее пространственно-временного распределения были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) с 1998 по 2017 г. за безледоставный период.

Радиометр AVHRR установлен на борту метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) с околополярной орбитой. Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире. Полоса обзора радиометра AVHRR в 2600 км позволяет просматривать всю акваторию оз. Байкал за один пролет.

На участке электромагнитного спектра 0,59–0,69 мкм, который соответствует 1 каналу радиометра AVHRR, спектральное альbedo чистой воды низкое (рис. 1). Однако при уменьшении прозрачности как за счет увеличения содержания взвешенных веществ, так и при «цветении» водоема, в указанном выше диапазоне наблюдается повышение спектрального альbedo [Dev, Shanmugam, 2014], что дает предпосылку для восстановления величины условной прозрачности по данным 1 канала AVHRR.

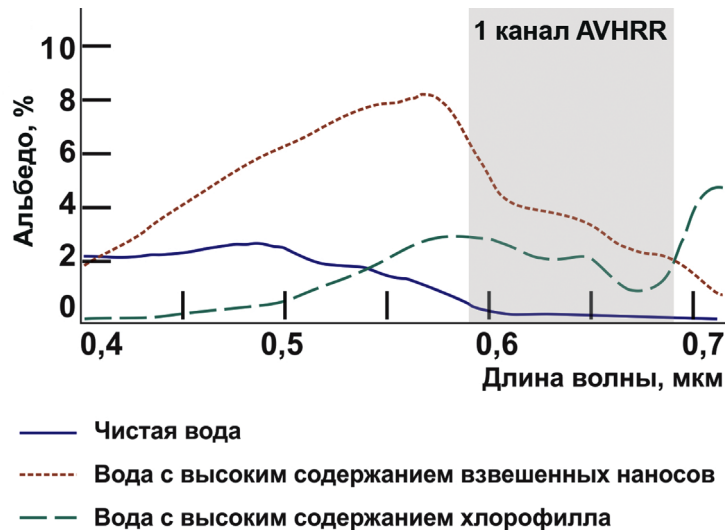


Рис. 1. Спектральное альбедо чистой воды и воды с высоким содержанием хлорофилла или взвешенных наносов согласно [Dev, Shanmugam, 2014]

Fig. 1. Spectral albedo of pure water and water with a high chlorophyll content or suspended sediment according to [Dev, Shanmugam, 2014]

В ходе исследования на основании сопоставления массивов судовой и спутниковой информации были разработаны региональные методики оценки условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным радиометра AVHRR, с различием по времени спутниковых данных с соответствующими судовыми измерениями не более 200 минут. Для учета существенного вклада в величину спектрального альбедо высоты солнца в работе использовались значения нормализованного альбедо 1 канала AVHRR для дальнейшего сопоставления с судовыми измерениями условной прозрачности. Влияние облачности уменьшено отбором снимков с низким содержанием облачности в районе оз. Байкал, фильтрацией облачности, а также расчетом минимальных значений нормализованного альбедо по всем доступным снимкам, попадающим в 200-минутный интервал времени между спутниковыми и судовыми съемками. Кроме уменьшения помех от полупрозрачной облачности расчет минимального альбедо позволяет снизить влияние волнения на величину альбедо. Также при волнении изменяется не только альбедо поверхности, но и сама величина условной прозрачности [Шамраев, Шишкина, 1980], что уменьшает вклад данного фактора в ошибку при оценке условной прозрачности.

В результате были получены зависимости величины условной прозрачности D_s , м, от нормализованного альбедо 1 канала AVHRR A_1 , % (рис. 2):

– для периода с начала июня по середину июля и с середины сентября по конец октября зависимость линейного вида –

$$D_s = -a_s A_1 + b_s \quad (1)$$

со среднеквадратической ошибкой, равной 1,9 м, и коэффициентом детерминации, равным 0,82,

– для периода с середины июля по середину сентября зависимость вида –

$$D_s = c_s - d_s (f_s - A_1)^k \quad (2)$$

со значением среднеквадратической ошибки, равным 0,9 м, и коэффициентом детерминации 0,66, где a_s , b_s , c_s , d_s , f_s и k – региональные регрессионные коэффициенты.

Наличие двух зависимостей объясняется более выраженным «цветением» водоема с середины июля по середину сентября.

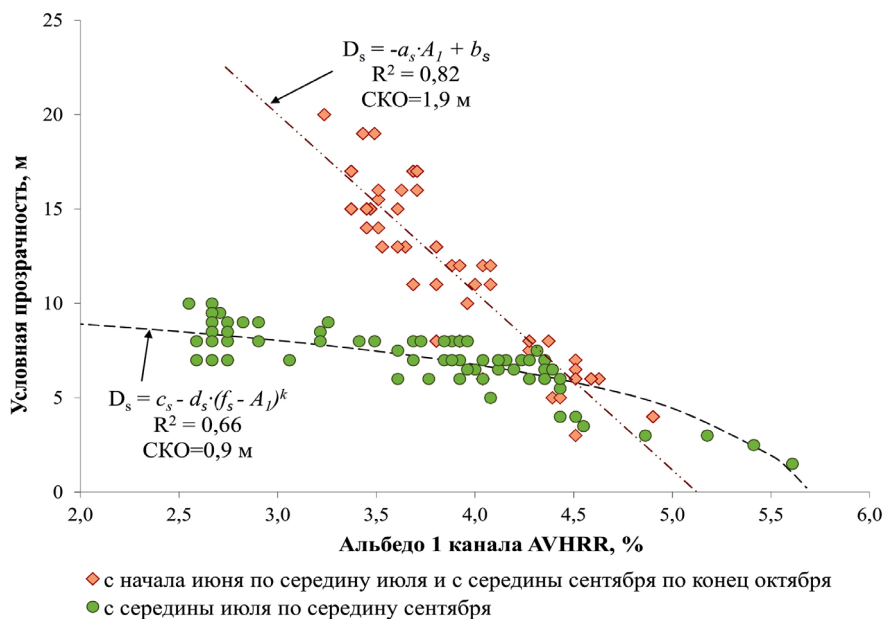


Рис. 2. Зависимости значения условной прозрачности от величины нормализованного альbedo 1 канала радиометра AVHRR

Fig. 2. Relationships between of the magnitude of relative transparency and the value of the normalized albedo of AVHRR band 1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием данных зависимостей были составлены картосхемы распределения условной прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал в период с июня по октябрь 1998–2017 гг. Примеры картосхем распределения прозрачности за отдельные годы приведены на рис. 3.

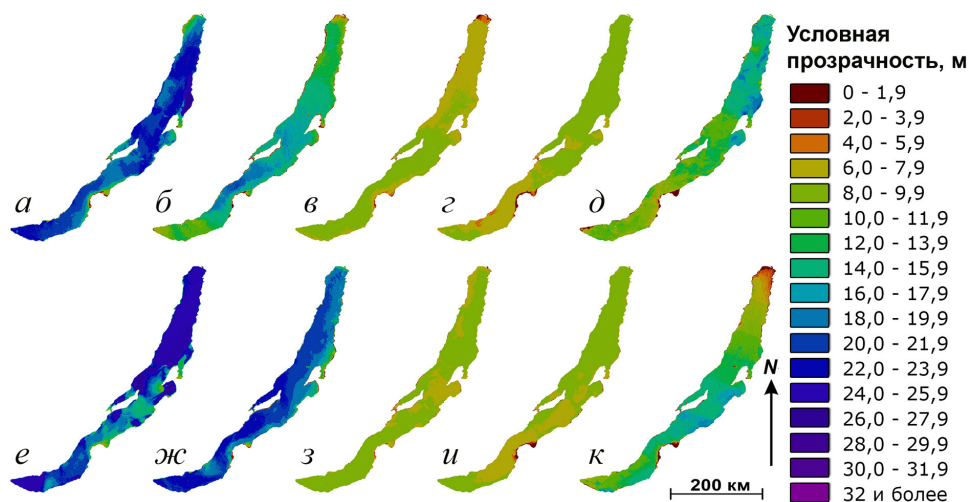


Рис. 3. Распределение условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным AVHRR в 2012 г.:

а – 13 июня; б – 1 июля; в – 28 июля; г – 1 сентября; д – 6 октября и 2013 г.: е – 10 июня; ж – 26 июня; з – 26 июля; и – 31 августа; к – 14 октября

Fig. 3. The distribution of relative water transparency of the surface layer of Lake Baikal according to AVHRR data in 2012:

а – June 13; б – July 1; в – July 28; г – September 1; д – October 6 and in 2013: е – June 10; ж – June 26; з – July 26; и – August 31; к – October 14

Результаты спутниковых измерений показали, что прозрачность поверхностного слоя воды в оз. Байкал имеет существенную пространственно-временную изменчивость и в ходе прозрачности за период с июня по октябрь в глубоководных районах озера наблюдается хорошо заметный максимум в июне – начале июля, который связан с интенсивным вертикальным перемешиванием во время весенней гомотермии [Шерстянкин, 1987; Поповская и др., 2008]. В конце июля – начале сентября по данным спутникового мониторинга наблюдается выраженный минимум прозрачности, который объясняется «цветением» фитопланктона. Согласно составленным картосхемам, за период с июня по октябрь в 1998–2017 гг. условная прозрачность воды в поверхностном слое оз. Байкал изменялась от менее чем 0,1 м в непосредственной близости от дельты р. Селенги, в заливах Провал и Посольский сор, до 27,5 м в глубоководных районах водоема.

В работе также определены значения и изучен ход средней величины условной прозрачности воды в поверхностном слое некоторых лимнических районов и оз. Байкал в целом (рис. 4). Ход прозрачности в приведенных на рис. 4 акваториях при наличии заметной внутригодовой изменчивости изменяется от года к году не так существенно, и наибольшие межгодовые отличия наблюдаются в конце июня – июле, что связано с более ранним или более поздним прогревом озера и, соответственно, с более ранним или более поздним началом «цветения» воды.

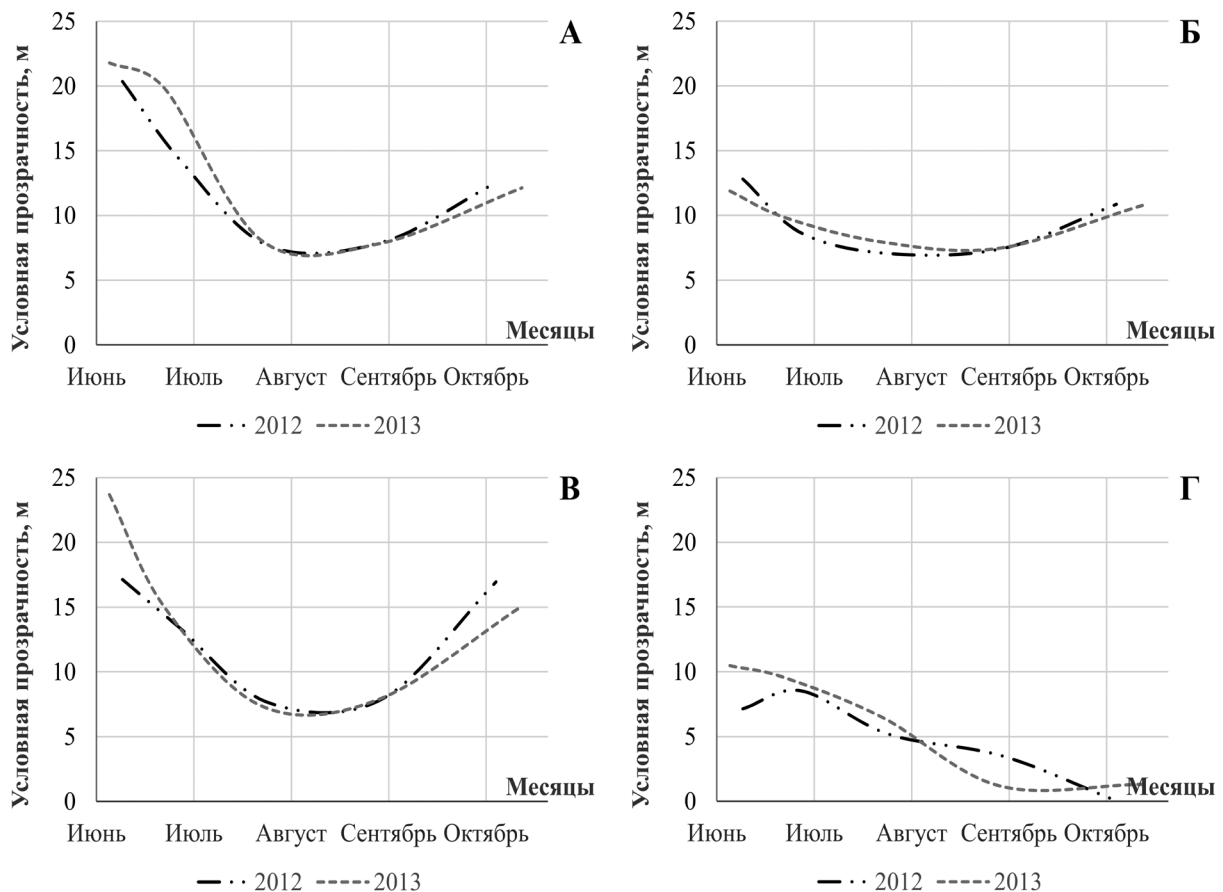


Рис. 4. Ход средних значений условной прозрачности воды на поверхности на поверхности всей акватории оз. Байкал (А), в Чивыркуйском заливе (Б), в Баргузинском заливе (В) и в заливе Провал (Г)

Fig. 4. Relationships between of the magnitude of relative transparency and the value of the normalized albedo of AVHRR band 1

В отдельных лимнических районах ход прозрачности может существенно отличаться за счет их морфометрических условий, слагающих дно пород, термического и динамического режима, перераспределения вод притоков, а также в зависимости от характера развития в различных районах планктона. Так в мелководных заливах, например, в заливе Провал, ход прозрачности характеризуется смещением ее минимума на сентябрь-октябрь, что, вероятно, происходит из-за дополнительного взмучивания воды в результате действия штормовых ветров в данное время года. Согласно классификации [Китаев, 1984], в целом за период исследования воду в поверхностном слое оз. Байкал отличает очень высокая прозрачность и только во время осенне-летнего минимума, с конца июля по середину сентября, воду в поверхностном слое озера в среднем характеризует высокая прозрачность. Аналогичная ситуация наблюдается в Чивыркуйском и Баргузинском заливах. В заливе Провал согласно указанной классификации вода в поверхностном слое имеет высокую или очень высокую прозрачность в период с начала июня по конец июля, затем прозрачность падает до малой или очень малой.

По соотношению степени загрязнения воды с условной прозрачностью [Шитиков и др., 2003] вода в поверхностном слое оз. Байкал в целом относится к очень чистой в течение всего анализируемого периода с июня по октябрь, однако в мелководных заливах, таких как залив Провал, в сентябре-октябре в отдельные годы позволяет по величине условной прозрачности отнести воду в поверхностном слое к умеренно загрязненной, загрязненной или даже к грязной.

ВЫВОДЫ

Разработанные в рамках исследования региональные методики дают возможность с удовлетворительной точностью оценивать и картировать условную прозрачность воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным AVHRR. Данные о пространственно-временном распределении прозрачности в озере, полученные в результате исследования, хорошо согласуются с материалами судовых измерений [Шерстянкин, 1987; Поповская и др., 2008] и в свою очередь позволяют дополнять и уточнять имеющуюся информацию о поле условной прозрачности воды в поверхностном слое озера, а также изучать внутригодовую и межгодовую изменчивость этой характеристики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 17-29-05045.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, No 17-29-05045.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Китаев С.П.* Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
2. *Поповская Г.И., Усольцева М.В., Фирсова А.Д., Лихошвай Е.В.* Оценка состояния весеннего фитопланктона озера Байкал в 2007 году // География и природные ресурсы. 2008. № 1. С. 83–88.
3. *Суторихин И.А., Букастый В.И., Акулова О.Б.* Динамика гидрооптических характеристик разнотипных озер Алтайского края // Известия АлтГУ. 2013. № 1–1 (77). С. 178–183.
4. *Шамраев Ю.И., Шишкина Л.А.* Океанология. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 386 с.
5. *Шерстянкин П.П.* Пространственное распределение прозрачности в Малом море и его связь с динамикой вод // Продуктивность Байкала и антропогенные изменения его природы. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1974. С. 54–62.

6. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
7. Dev P.J., Shanmugam P. New model for subsurface irradiance reflectance in clear and turbid waters // *Optics Express*. 2014. V. 22, issue 8. P. 9548–9566.
8. Troitskaya E., Blinov V., Ivanov V., Zhdanov A., Gnatovsky R., Sutyryna E., Shimaraev M. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal // *Aquatic Sciences*. 2015. V. 77, issue 2. P. 171–182. DOI: 10.1007/s00027-014-0361-8.

REFERENCES

1. Dev P.J., Shanmugam P. New model for subsurface irradiance reflectance in clear and turbid waters. *Optics Express*. 2014. V. 22, Issue 8. P. 9548–9566.
2. Kitaev S.P. Ecological bases of bioproductivity of lakes of different natural zones. M.: Nauka, 1984. 207 p. (in Russian).
3. Popovskaya G.I., Usoltseva M.V., Firsova A.D., Likhoshvay E.V. Assessment of the state of spring phytoplankton of Lake Baikal in 2007. *Geography and Natural Resources*. 2008. No 1. P. 83–88 (in Russian).
4. Shamraev Yu.I., Shishkina L.A. *Oceanology*. L.: Gidrometeoizdat, 1980. 386 p. (in Russian).
5. Sherstyankin P.P. Spatial distribution of transparency in the Small Sea and its relationship with water dynamics. *Produktivnost' Bajkala i antropogennye izmeneniya ego prirody*. Irkutsk: ISU, 1974. P. 54–62 (in Russian).
6. Shitikov V.K., Rosenberg G.S., Zinchenko T.D. Quantitative hydroecology: methods of system identification. Togliatti: IEVB RAS, 2003. 463 p. (in Russian).
7. Sutorikhin I.A., Bukaty V.I., Akulova O.B. Dynamics of hydro-optical characteristics of different types of lakes in the Altai Territory. *Izvestija Altajskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2013. No 1–1 (77). P. 178–183 (in Russian).
8. Troitskaya E., Blinov V., Ivanov V., Zhdanov A., Gnatovsky R., Sutyryna E., Shimaraev M. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal. *Aquatic Sciences*. 2015. V. 77, issue 2. P. 171–182. DOI: 10.1007/s00027-014-0361-8.

Шереметская Е.Д.¹, Иванов М.М.², Ворошилов Е.В.³, Гаранкина Е.В.⁴, Беляев В.Р.⁵

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КРУПНОМАСШТАБНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ В ЦЕЛЯХ ИЗУЧЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

АННОТАЦИЯ

Скоротечные преобразования дневной поверхности и рыхлых четвертичных отложений не находят своевременного отклика в открытых картографических источниках – крупномасштабных топографических картах, данных дистанционного зондирования высокого разрешения. В этой связи актуальность приобретает использование современных технологий анализа пространственных данных, получаемых при помощи беспилотных летательных аппаратов. Благодаря своей мобильности и дешевизне эксплуатации они имеют широкие перспективы использования в системных геоморфологических исследованиях и мониторинге экстремальных процессов на этапах обнаружения и наблюдения как за собственно процессом в действии, так и за последствиями его проявления. Исследован участок интенсивной трансформации селевыми процессами, в том числе типичными грязекаменными селями и более специфичными водоснежными потоками, днища горной долины р. Сенгисйок, прорезающей западный склон Ловозерских тундр (Кольский п-ов, северо-западная территория России). Выполнена аэрофотосъемка беспилотным летательным аппаратом вертолетного типа с ручной системой управления DJI Phantom 3 Standard, построены и проанализированы ортофотоплан, ЦМР и их результирующие (схемы геоморфологического дешифрирования, продольные и поперечные профили современного вреза долины и русла Сенгисйок). На примере ключевого участка показана возможность крупномасштабного одновременного наблюдения за плановыми очертаниями сложно взаимосвязанных форм рельефа различного генезиса, определения их линейных и площадных параметров, объемов переработки рыхлого материала. По итогам работ предложены принципиальная схема и последовательность действий при изучении быстро меняющихся геоморфологических объектов с применением беспилотной аэрофотосъемки, не только для интересов фундаментальной науки, но с целью их мониторинга и прогнозирования для обеспечения безопасности человека и хозяйственных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: беспилотные летательные аппараты, крупномасштабное картографирование, экстремальные геоморфологические процессы, сели, Ловозерские тундры.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, каф. геоморфологии и палеогеографии, Ленинские горы, ГСП-1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* sheremetskaya@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Ленинские горы, ГСП-1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* ivanovm@bk.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, Ленинские горы, ГСП-1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* voroshilov@yahoo.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, Ленинские горы, ГСП-1, 119991, Москва, Россия *e-mail:* evgarankina@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Ленинские горы, ГСП-1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* vladimir.r.belyaev@gmail.com

Elena D. Sheremetskaya¹, Maxim M. Ivanov², Egor V. Voroshilov³,
Ekaterina V. Garankina⁴, Vladimir R. Belyaev⁵

USING UAV LARGE-SCALE AERIAL PHOTOGRAPHY FOR STUDYING HAZARDOUS GEOMORPHOLOGICAL PROCESSES

ABSTRACT

Short-term transformations of actual topography and Quaternary deposits do not opportunely reflect in the open cartographic sources – on small-scale topographic maps and high-resolution remote sensing data. Thereby, the use of modern technologies for analysis of the spatial data obtained with unmanned aerial vehicles (UAVs) becomes quite relevant. High mobility and relatively cheap exploration determine broad perspective using UAVs data in regular geomorphological studies. It is also applicable in monitoring extreme and hazardous phenomena on either stages of detecting or observing the process itself and interpreting its consequences. Case study site of the Sengisjok River Valley bottom intensively transformed by debris flow processes including typical granular debris flows and specific slushflows was investigated. The mountain valley incises the Western slope of the Lovozerskiye Tundry massif at the Kola Peninsula, Northwestern Russia. Aerial photography survey was accomplished using the unmanned aerial vehicle (helicopter type) DJI Phantom 3 Standard controlled by human operator. Orthoimage mosaics, DEM and its derivatives (geomorphic interpretation, longitudinal and cross-section profiles of the modern valley and riverbed incisions of the Sengisjok River) were retrieved and analyzed. Linear and spatial parameters and dynamics of landforms with complexly arranged outlines and of different genetic types and volumes of reworked deposits were determined. The potential of immediate small-scale observations obtained by UAV was evaluated on the example of the case study site. As a result, a basic setup and implied algorithms for studying rapidly changing geomorphic units using unmanned aerial photography was proposed. It shows potential as for the fundamental scientific purposes as for monitoring and predicting hazardous process to ensure social awareness and infrastructure safety.

KEYWORDS: Unmanned Aerial Vehicles, small-scale cartography, hazardous geomorphological processes, debris flow, Lovozerskiye Mountains.

ВВЕДЕНИЕ

Экстремальные геоморфологические процессы – современные быстротекущие процессы, возникающие вследствие значительных отклонений среднесуточных характеристик, влияющих на них внешних и внутренних факторов окружающей среды (собственно геолого-геоморфологических, климатических, гидрологических, антропогенных и пр.). В условиях контрастного горного рельефа степень готовности геоморфологических систем выйти из состояния равновесия увеличивается. Такие процессы как обвалы, оползни, снежные лавины и водоснежные потоки приобретают высокую интенсивность, приводя к значительному и зачастую

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Leninskie gory, GSP-1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail*: sheremetskaya@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, The Makkaveev laboratory of soil erosion and fluvial processes, Leninskie gory, GSP-1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail*: ivanov@bk.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Leninskie gory, GSP-1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail*: voroshilov@yahoo.com

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Leninskie gory, GSP-1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail*: evgarankina@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, The Makkaveev laboratory of soil erosion and fluvial processes, Leninskie gory, GSP-1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail*: vladimir.r.belyaev@gmail.com

единовременному преобразованию рельефа, поверхностных и приповерхностных отложений. К подобным «стихийным бедствиям», безусловно, следует относить и сели – **русловые грязекаменные потоки** высокой интенсивности. Они «внезапно» возникают в горных речных бассейнах при превышении пороговых значений гидрогеологических элементов – интенсивности снеготаяния, ливневых осадков, либо провоцирующих процессов иного генезиса (обвалы и лавины в акватории подпрудных озер). Характеризуются пульсационным движением, кратковременной активностью и высокими значениями своих параметров – содержанием обломочного материала до 75 %, глубиной потока более 10–20 м, скоростью более 10 м/с, объемом выноса рыхлого материала более 0,6–6 млн м³.

Ловозерский горный массив не является исключением, относясь к регионам развития климатически обусловленных селевых явлений средней активности, снегового и дождевого (с преобладанием снегового) типа Кольской области, холодной зоны [Национальный атлас..., 2004; Романенко и др., 2011, Perov et al., 2017]. Селевой период здесь **продолжается** с мая по август, период наибольшей опасности, как правило, приходится на май-июнь.

Скоротечные преобразования дневной поверхности и рыхлых четвертичных отложений не находят своевременного отклика в открытых картографических источниках – крупномасштабных топографических картах, данных дистанционного зондирования высокого разрешения. В этой связи актуальность приобретает использование современных технологий анализа пространственных данных, получаемых при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Благодаря своей мобильности и дешевизне эксплуатации они имеют высокие перспективы использования в системных исследованиях и мониторинге экстремальных геоморфологических процессов на этапах обнаружения и наблюдения как за собственно процессом в действии, так и за последствиями его проявления (зонами формирования, потенциального поражения, преобразования на протяжении временных отрезков различной длительности), а также в целях прогнозирования [Грядун и др., 2012; Медведев и др., 2016; Piras et al., 2017].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые наблюдения

Долина р. Сенгисйок приурочена к западной окраине Ловозёрского горного массива (рис. 1) – магматической островной системе в области относительных новейших поднятий со скоростями $+4...+6 \pm 1$ мм/год [Пожиленко и др., 2002]. В морфоскульптурном отношении горы относятся к областям развития экзарационно-нивальных и аккумулятивных форм горных оледенений, расчлененных наложенной эрозионной сетью.

Долина протягивается с восток-северо-востока на запад-юго-запад между плато Ангвундасчорр на севере и Сенгисчорр на юге. Общая длина долины около 8,0 км, в том числе горной части около 5,0 км. На расстоянии 3,5 км от истока сформирован тектонически обусловленный субмеридиональный отрезок длиной не многим более 1,0 км. Река берет начало в каровом оз. Сенгисъявр (726 м над уровнем моря) и впадает в Умбозеро на высоте 152 м над уровнем моря. Общий перепад высот от истока к устью достигает 575 м, врез долины относительно вершинных частей прилегающих горных массивов достигает более 200 м.

На протяжении первого километра Сенгисйок течет по днищу ледникового цирка размером $1 \times 0,5$ км, со средним уклоном 0,014 и хаотичным моренно-грядовым рельефом. Ниже современный врез вложен в троговую долину, с осложняющим ее хаотичным грядово-ложбинным рельефом неравномерной аккумуляции горного оледенения и разновозрастными селевыми террасами и грядами. На бортах долины фиксируются скальные уступы изначально тектонического происхождения, проработанные экзарационными процессами, высотой до 10 м, участки осыпных склонов высотой более 40 м, обвалованные русла и тела микроселей, блоки отседания. Эрозионно-аккумулятивное днище долины

на этом отрезке сложноустроенное, четковидное, с продольным уклоном от 0,08 до 0,1. Русло местами разбивается на множество рукавов (в том числе сухих), осложнено островами, валами высотой до 3,0 м и зонами локальной селевой аккумуляции веерообразной в плане и грядово-ложбинной в профиле формы. Приустьевой, равнинный отрезок долины, протяженностью около 3,0 км и продольным уклоном в среднем 0,06, характеризуется сменой участков рельефа разного генезиса. От уреза Умбозера последовательно сменяют друг друга озерная терраса (162,0–166,0 м над уровнем моря), останцы моренной равнины покровного оледенения (181,0–186,0 м над уровнем моря) и наложенная на них пролювиальная равнина, созданная слившимися конусами выноса рек Сенгисйок и Ангуайок.

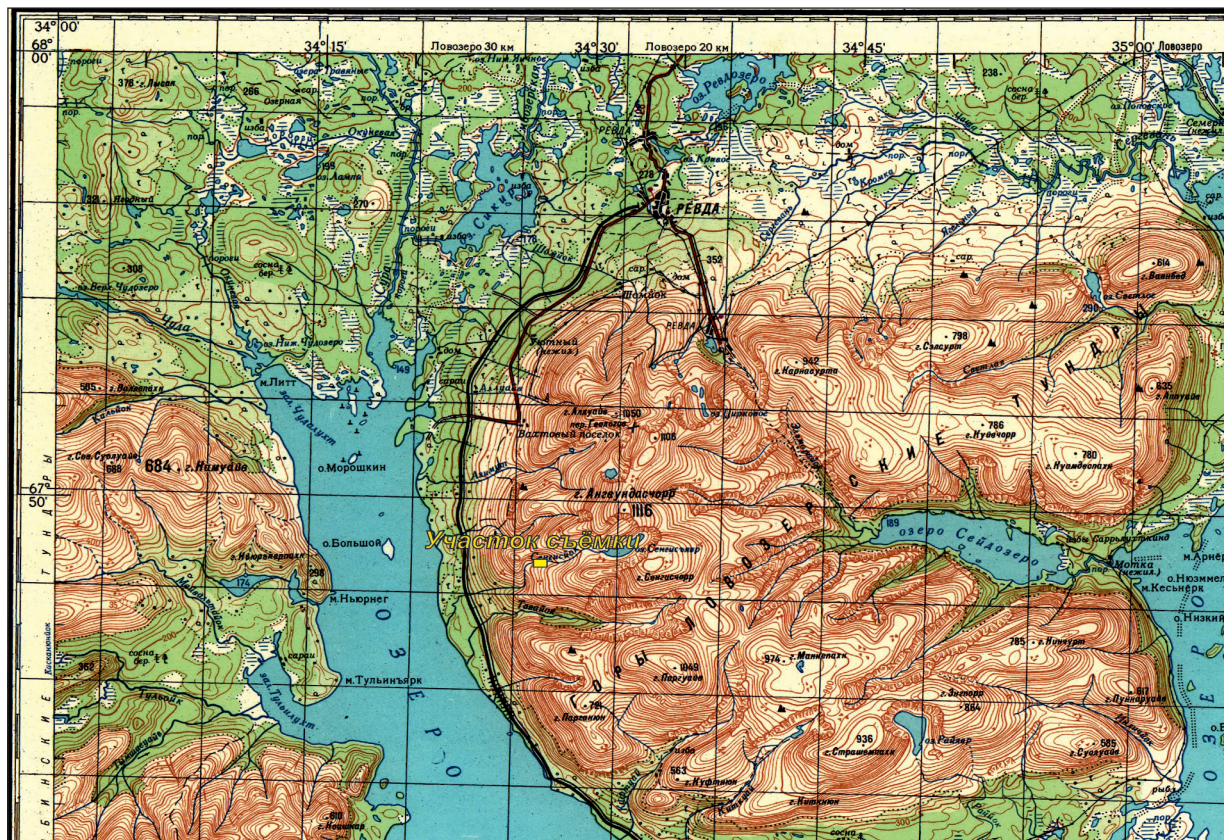


Рис. 1. Положение участка съемки БПЛА в Ловозёрских тундрах
Fig. 1. Study area at the Lovozerskiye Mountains

В геологическом отношении район исследований приурочен к контакту Ловозёрской щелочной интрузии и вмещающего ее комплекса раннеархейских интрузий [Пожиленко и др., 2002]. В долине Сенгисйока развиты флювиогляциальные и ледниковые отложения горного и покровного оледенений мощностью 30–35 м (определение по выраженному в современном рельефе врезу долин) [Беляев и др., 2010]. Селевые накопления отмечены как в современном днище, так и слагают вложенные в ледниковые толщ террасы высотой до 15–25 м над руслом. Источником материала для них служили как накопленные ранее моренные образования, так и обломки с прилегающих горных склонов. В нижнем течении река врежется в такие сцементированные селевые отложения до подстилающих коренных пород, затем распадываясь на мощном пролювиальном конусе.

Основные современные геоморфологические процессы – курумообразование в комплексе с солифлюкцией, крипом, обвалами и осыпями, селями, лавинами и гравитационным отседанием склонов. Среди опасных явлений западной части Ловозёрского

массива выделяются водоснежные потоки [Водоснежные потоки..., 2001] и катастрофические паводки, сходящие из верхних частей долин рек и их притоков. Экстремальные селевые процессы выносят из верховий Сенгисйока большие объемы крупных обломков в пологие предгорья Ловозёр и на прилегающую ледниковую равнину. Характерные и для соседних долин древние селевые потоки, будучи переполнены наносами, широко разливались по этим выположенным поверхностям, формируя как отдельные конусы выноса, так и подгорную пролювиальную равнину.

Последний экстремальный селевой паводок наблюдался в низовьях долины Сенгисйока 3 июля 2017 г. В течение 40 минут вода заполнила ранее сухие протоки, затопила днище долины и часть прилегающей пролювиальной равнины. Поток разлился полосой шириной около 800–1000 м выше подпрудившей его насыпи железной дороги Ревда – Октябрьский, и на 50–100 м ниже ее. На реке образовывались плотины из снега, выносимого из верховьев, и крупных стволов деревьев. В течение часа после начала паводка поступление снега прекратилось. Часть стока перенаправилась через бывшее сухое русло в ручей к северу от Сенгисйока.

Дистанционное воздушное зондирование

6 сентября 2017 г. проведена аэрофотосъемка четырех участков наиболее интенсивной июльской трансформации днища долины Сенгисйока с помощью беспилотного летательного аппарата вертолетного типа с ручной системой управления DJI Phantom 3 Standard [http://www.dji.com/phantom-3-standard/]. Управление осуществлялось в режиме дистанционного пилотирования при помощи пульта и подключенного цифрового устройства, оснащенного модулем Wi-Fi, операционной системой Android и приложением DJI Go. В беспилотную авиационную систему включены: интегрированная навигационная система; приемник спутниковой навигационной системы (GPS); накопитель полетной информации (карта памяти формата MicroSD); цифровая фото-видеокамера GoProPanasonic модель FC300C с системой стабилизации изображения. Фокусное расстояние составляет 3,61 мм (20 мм в 35-мм эквиваленте), угол обзора 94°, максимальный размер изображения 4000 × 3000, размер пикселя 1,56 × 1,56 мкм. Камера не требует калибровки.

С целью изучения активных проявлений селевого процесса был выбран верхний по течению участок трансформации долины в 2,70 км ниже истока Сенгисйока (см. рис. 1). Выполнен один залет со средней высотой съемки 107 м от точки взлета. Съемка велась в надир (под прямым углом к поверхности), перспективная съемка не производилась. Суммарное количество фотоснимков составило 26 шт. (рис. 2), продольное перекрытие достигает примерно 90–95 %. Общая площадь покрытия исследуемой территории – 45 200 м².

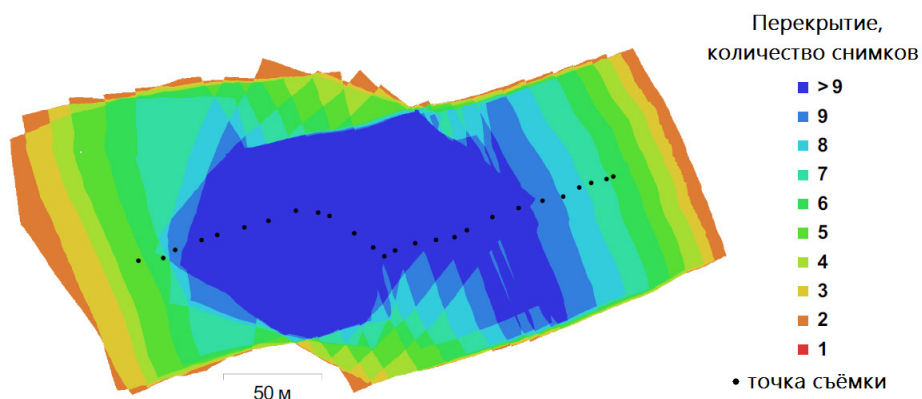


Рис. 2. Схема перекрытия аэрофотоснимков при съемке БПЛА участка долины р. Сенгисйок 06.09.2017

Fig. 2. Camera locations and image overlaps. Investigated section of the Sengisiok River Valley. 06.09.2017

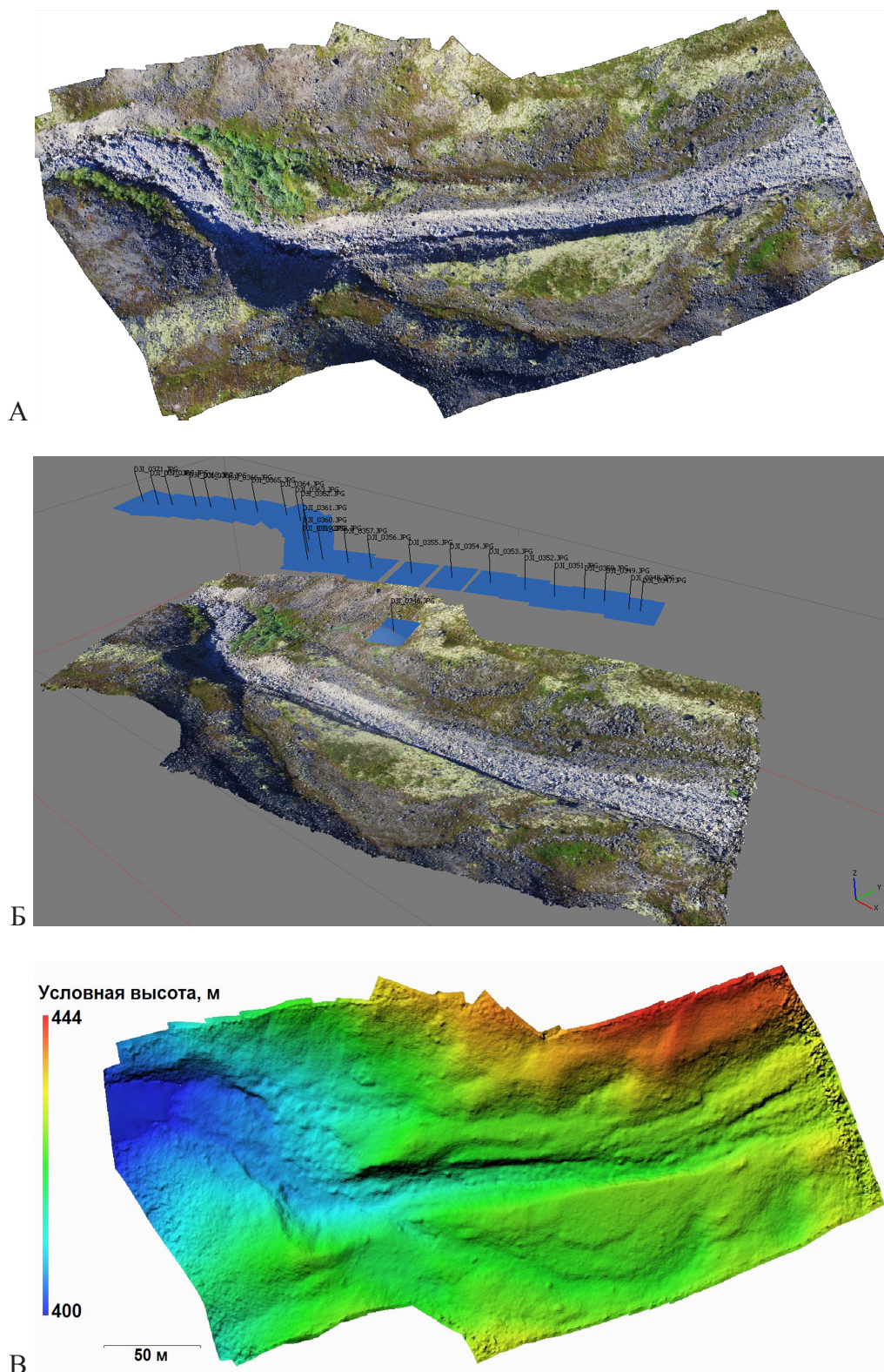


Рис. 3. Отдельные этапы технологического процесса обработки данных БПЛА:
 А – ортофотоплан изученного участка долины р. Сенгисйок; Б – плотное облако точек,
 полученное при автоматической интерполяции в программе Agisoft Photoscan 1.4.1.
 (перспективный вид); В – Цифровая модель рельефа

Fig. 3. Technological stages of UAV data processing:
 A – orthoimage mosaics of the case study section of the Sengisjokvalley; Б – dense point cloud obtained
 by automatic interpolation in AgisoftPhotoscan 1.4.1. (perspectiveview); B – digitalelevation model

Для обработки материалов аэрофотосъемки и создания картографической продукции (ортофотоплан, цифровая модель рельефа и их производные) использовалась программа Agisoft Photoscan 1.4.1. Технологический процесс включал в себя (рис. 3): а) выбор аэрофотоснимков, их загрузку в программу; б) обработку аэрофотоснимков (определение их пространственных координат (широта и долгота в системе координат WGS84, высота), выравнивание (автоматическая обработка, в результате которой угол съемки соответствует положению в надир), определение реперных точек); в) построение плотного облака точек (15,77 на 1 м²; с ошибкой репроецирования 0,979 пикс.); г) создание ЦМР (в растровой форме, в формате GeoTIFF), ортофотоплана (пространственное разрешение 3,42 см / пикс.), карты изогипс, геопривязанной 3-D модели; д) дальнейший анализ полученных материалов (построение продольных и поперечных топографических профилей, геоморфологическое дешифрирование ортофотоплана, расчет объемов современного вреза долины Сенгисйока и пр.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ортофотопланы – один из главных продуктов, получаемых на выходе из цифровых фотограмметрических систем. Целесообразность их построения объясняется высокой детальностью, возможностью оперативного выявления пространственного распространения форм рельефа (в том числе и вновь образованных «свежих»), пригодностью для геоморфологического дешифрирования. А также для создания результирующей картографической продукции (карт крутизны и кривизны поверхности, экспозиции, топографических профилей и др.), для дальнейшего создания общих и специальных геоморфологических карт, мониторинга и прогнозирования экстремальных геоморфологических процессов.

На ортофотоплане исследуемого участка долины Сенгисйока четко читаются несколько уровней рельефа. Практически сухое на момент съемки русло заполнено свежими и более древними селевыми наносами с характерным хаотичным (на транзитном участке) либо ложбинно-грядовым (в зонах локального торможения на повороте) микрорельефом. По обоим берегам от основного русла, в шахматном порядке располагаются террасовидные разновысотные поверхности, не затронутые июльским паводком, о чем свидетельствует сохранение на них растительного покрова (рис. 4). Террасы имеют преимущественно селевое происхождение и сложены плохо сортированной толщей грубообломочных осадков, изредка с озерными отложениями в цоколе. По левому борту на поверхности такой селевой террасы проходит ложбина, выстланная крупнообломочным материалом, местами покрытым тундровой растительностью. Она «впадает» в основное русло Сенгисйока висячим устьем и, расширяясь, вновь «вытекает» из него в юго-западном направлении. Таким образом, это элемент возвышенного древнего (ныне не активного) селевого днища долины. Более низкая и лучше заросшая (кустарниковой растительностью) селевая терраска по правому борту демонстрирует мелкогрядовый рельеф, субпараллельный современному руслу (веерообразно расходящийся от основной протоки).

С правого борта довольно четко прослеживается пологий ступенчатый эрозионный склон более древнего высотного уровня ледникового днища долины. Он перекрыт рыхлыми отложениями и частично занят растительностью. Для нижнего по течению участка характерно расширение современного вреза за счет более интенсивного бокового врезания на локальном повороте русла и зоны вынужденной селевой аккумуляции. Левый нижний край ортофотоплана захватывает участок ледниковой аккумуляции, фиксирующий высотное положение днища троговой долины, частично преобразованного селевыми и вероятно флювиогляциальными процессами.

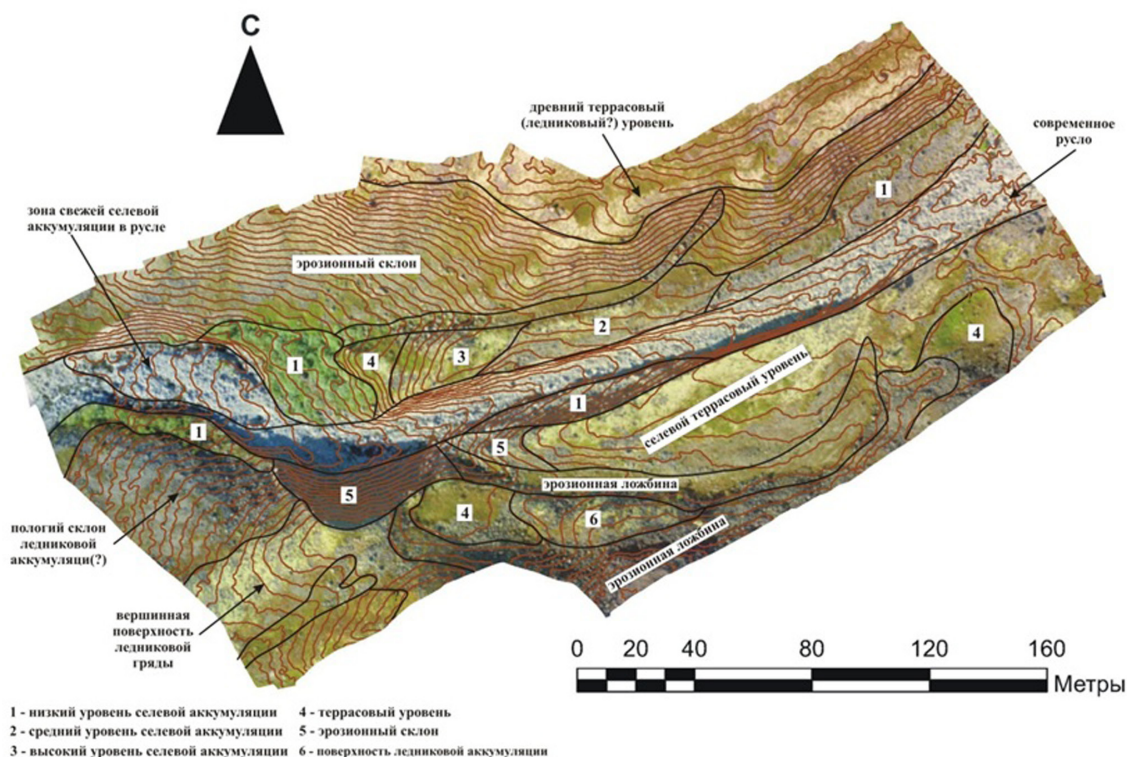


Рис. 4. Схема геоморфологического дешифрирования данных съемки БПЛА участка долины р. Сенгисйок – ортофотоплан с изогипсами (сечение 1 м)

Fig. 4. Geomorphologic interpretation of UAV data at the case study section of the Sengisjok valley – orthoimage mosaics with isohypes (vertical interval 1 m)

Цифровые модели рельефа служат хорошей основой для построения топографических профилей, отражающих детальное строение и изменение во времени и пространстве поперечных и продольных профилей днищ долин, находящихся в стадии современного перестроения. Так, активный в июле 2017 г. врез Сенгисйока имеет ширину по бровкам до 20–25 м (рис. 5, Б–Д), глубину до 3–4 м. Его днище в целом ящикообразное, с участками неравномерной аккумуляции селевого материала. При этом необходимо учитывать, что штатная навигационная система БПЛА обладает невысокой точностью, следовательно, картина распределения высот является относительной и нуждается в корректировке независимыми методами. Однако она оказывается вполне пригодной для целей геоморфологического дешифрирования и определения основных морфологических и морфометрических параметров форм рельефа, по крайней мере, на начальных стадиях изучения горных объектов.

Для интерпретации результатов современных рельефообразующих процессов и дальнейшей организации мониторинга их интенсивности в русле Сенгисйока проведена оценка объемов его современного вреза. Она основывалась на сопоставлении актуальной ЦМР и ее обработанного варианта со сглаженным (исключенным из ЦМР) врезом. Сглаживание производилось следующим путем. Плановые границы оцениваемого вреза были дешифрированы по ортофотоплану и получены в виде масок в файле формата *.shp. Затем по полученной маске из имеющейся ЦМР вырезалась часть растра, а весь растр конвертировался в массив точек, из которого затем строилась поверхность ЦМР при помощи модуля Торо to Raster. Таким образом, образованная после вырезания лакуна заполнялась. В результате получена сглаженная ЦМР без вреза. Далее из нее вычиталась исходная ЦМР и опять обрезалась по маске изучаемого вреза.

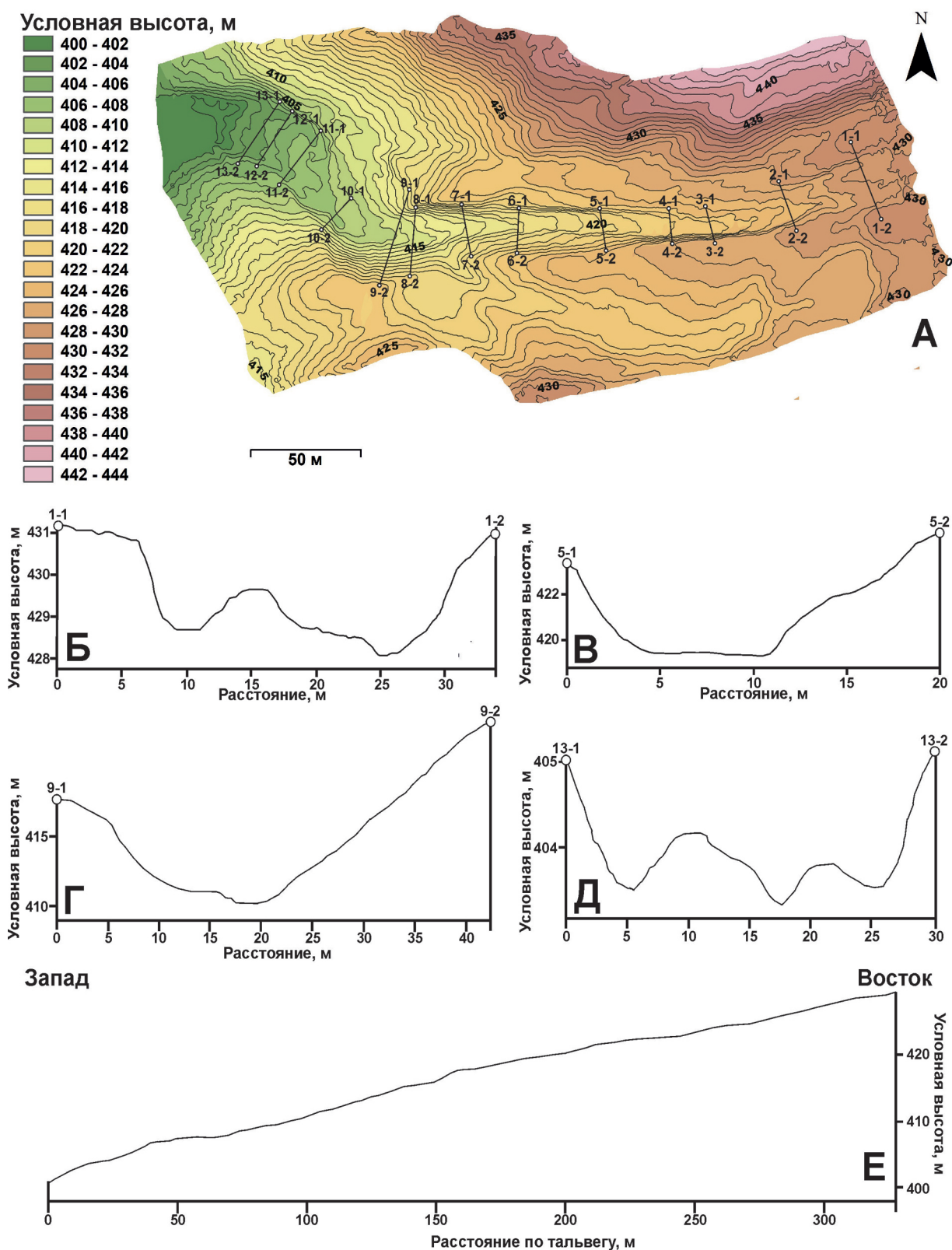


Рис. 5. Результаты обработки ЦМР участка долины р. Сенгисйок:
 А – карта в изолиниях (сечение 1 м); Б–Д – поперечные профили современного вреза долины;
 Е – продольный профиль русла

Fig. 5. Results of digital elevation model processing for the Sengisjok valley case study section:
 А – map in isohypes (vertical intervall 1 m); Б–Д – cross-sections of the modern incision;
 Е – longitudinal profile of the channel bed

Полученное растровое изображение представляет собой фактически распределение предполагаемой глубины вреза в пределах интересующей области (рис. 6). Исходя из площади (6641 м^2) и средней глубины вреза ($0,95 \text{ м}$) (разности между растрами), был определен его объем, равный 6803 м^3 .

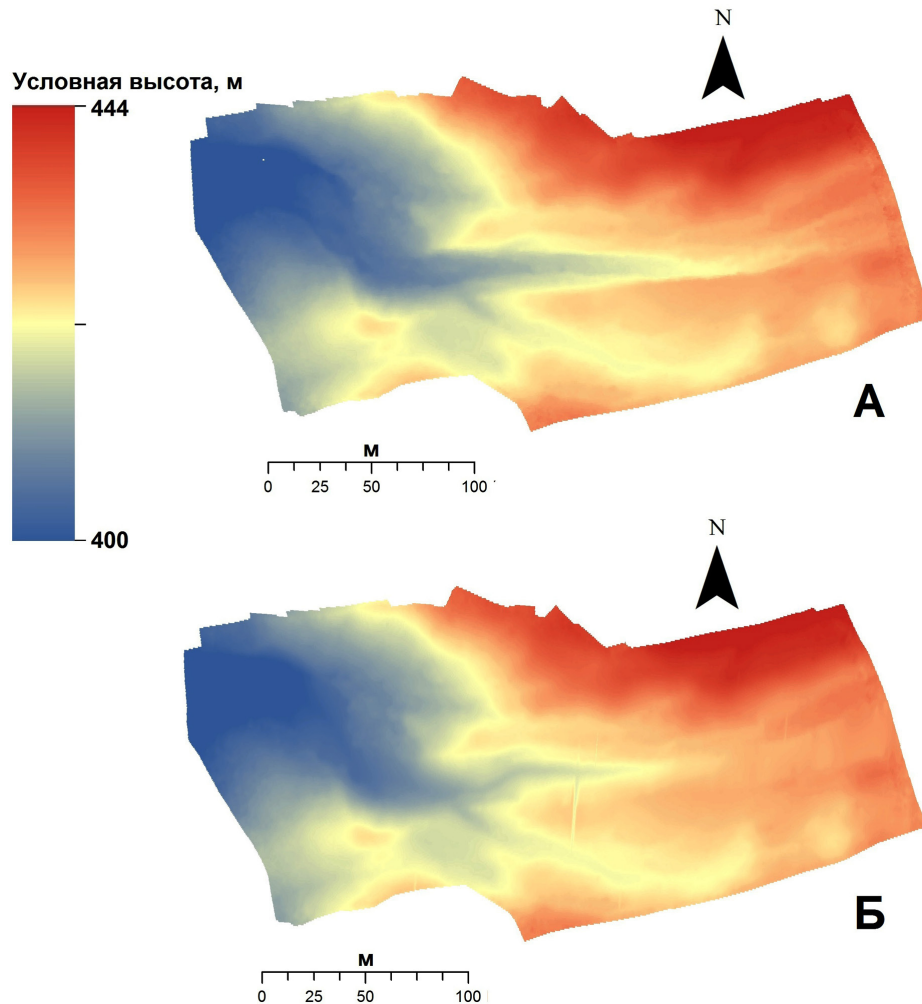


Рис. 6. Графическое отражение этапов определения объемов современного вреза долины р. Сегисйок:

А – исходная цифровая модель рельефа; Б – сглаженная модель

Fig. 6. Graphic setup of volume determination stages for the modern Sengisjok River incision:

A – initial DEM; B – smoothed DEM

ВЫВОДЫ

Днище долины р. Сегисйок в западной части Ловозёрского горного массива представляет собой арену активной трансформации рельефа водоснежными потоками и селевыми процессами. Последняя подобная трансформация произошла 3 июля 2017 г. Для получения общей картины сложного строения дневной поверхности, плановых очертаний и характера сочленений отдельных форм рельефа, а также максимально полной фиксации произошедших изменений, недостижимых при традиционном маршрутном обследовании, 6 сентября 2017 г. была проведена аэрофотосъемка беспилотным летальным аппаратом DJI Phantom 3 Standard. Полученные в ходе обработки мозаики изображений ортофотоплан

и цифровая модель рельефа позволяют на основе внешних признаков (наличие или отсутствие растительного покрова, фототон, геометрия и пр.) определить плановые очертания современного активного русла, разновысотных террасовидных уровней, склонов. В результате, объединив полученные сведения с данными традиционных полевых исследований и анализом литературных материалов, оказывается возможным получить детальную картину геоморфологического строения территории, в том числе относительные морфометрические параметры.

Ввиду высокой детальности полученного изображения возможно отслеживание не только пространственных сочетаний форм рельефа дневной поверхности, русловых переформирований, участков размыва и аккумуляции, вызванных экстремальными событиями и с большим или меньшим успехом читающихся на космических снимках высокого разрешения, но и вести мониторинг смещений единичных обломков, подсчет объемов эродируемого, транспортируемого и аккумулируемого материала. Фототон, вероятно, можно использовать в качестве маркера «свежести» или возраста наблюдаемых следов размыва и аккумуляции – не только на уровне присутствия или отсутствия растительного покрова, но и анализа оттенков (чем светлее, тем «свежее» форма).

На основе проведенного исследования предлагается следующая последовательность крупномасштабного изучения экстремальных экзогенных процессов. Первый этап – крупномасштабное геолого-геоморфологическое камеральное и полевое изучение района проявлений геоморфологического процесса, съемка арены его действия посредством БПЛА. Второй этап – составление ортофотопланов, цифровых моделей рельефа, 3-D модели объекта и их результирующих (топографических профилей, гипсометрических карт, карт уклонов, кривизны поверхности, возможных направлений стока и пр., определяющих морфологические особенности, интенсивность и динамику процесса), обработка полевых данных геолого-геоморфологической съемки (составление специальных геолого-геоморфологических материалов – профилей, общих и частных геоморфологических схем и пр.). Третий этап – сопоставление данных, полученных при ручном обследовании территории и путем обработки данных воздушного обследования, выявление очагов зарождения и площадей распространения геоморфологических процессов, качественных и количественных характеристик их проявлений и пр. Четвертый этап – повторные обследования территории, построение динамических и статических моделей развития, прогноз.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность сотрудникам и студентам кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова Ф.А. Романенко, А.И. Рудинской, А.И. Бондарю и Ю.В. Шишкиной в проведении полевых работ и обработке материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00630а, «Пространственно-временные аспекты взаимодействия селевых и флювиальных процессов в долинах низкогорий Кольского полуострова») по теме госзадания АААА-А16-11632810089-5 «Эволюция природной среды, динамика рельефа и геоморфологическая безопасность природопользования».

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors are grateful to the staff and students of the Department of Geomorphology and Paleogeography (Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University) F.A. Romanenko, A.I. Rudinskaya, A.I. Bondar and Yu.V. Shishkina.

The study was supported by the RFBR project No 17-05-00630 and GM АААА-А16-11632810089-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Ю.Р., Новикова Н.Г., Романенко Ф.А. Роль водно-ледниковой аккумуляции в формировании грядового рельефа побережья Умбозера (Кольский полуостров) // Геоморфологические процессы и их прикладные аспекты. VI Щукинские чтения – Труды. М.: Географический ф-т МГУ, 2010. С. 270–272.
2. Водоснежные потоки Хибин / Под ред. А.Н. Божинского, С.М. Мягкова. М.: Географический факультет МГУ, 2001. 167 с.
3. Грядунов Д.А., Митрофанов Е.В., Бубненко Д.И. О применении комплексов беспилотных летательных аппаратов в системе многоуровневого экологического мониторинга // Вестник Московского государственного областного университета. Серия Естественные науки. 2012. № 4. С. 95–99.
4. Медведев А.А., Алексеенко Н.А., Курамагомедов Б.М. Возможности и ограничения использования БПЛА в географических исследованиях // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. Т. 60, № 5. С. 117–122.
5. Национальный атлас России. Т. 2. Природа и экология. М.: ФГУП «ГОСГИСЦЕНТР», 2004. 495 с. Электронный ресурс: www.национальныйатлас.рф/cd2/index.html (дата обращения: 01.03.2018)
6. Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В. Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 359 с.
7. Романенко Ф.А., Лукашов А.А., Шилова О.С. Катастрофические гравитационные процессы на севере Европейской России и опыт их абсолютного датирования // Геоморфология. 2011. № 1. С. 87–94. DOI: 10.15356/0435-4281-2011-1-87-94.
8. Perov V., Chernomorets S., Budarina O., Savernyuk E., Leontyeva T. Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events. Natural Hazards 88. 2017. P. 199–235. DOI: 10.1007/s11069-017-2841-3.
9. Piras M., Taddia G., Forno M.G., Gattiglio M., Aicardi I., Dabove P., Lo Russo S. & Lingua A. Detailed geological mapping in mountain areas using an unmanned aerial vehicle: application to the Rodoretto Valley, NW Italian Alps, Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2017. V. 8:1. P. 137–149. DOI: 10.1080/19475705.2016.1225228.

REFERENCES

1. Belyaev Yu.R., Novikova N.G., Romanenko F.A. The role of water-glacial accumulation in the formation of the ridge relief of the Umbozero coast (Kola Peninsula). Geomorphological processes and their applied aspects. VI Schukin Readings – Proceedings. Moscow: Geographical Faculty of Moscow State University, 2010. P. 270–272 (in Russian).
2. Pozhilenko V.I., Gavrilenko B.V., Zhirov D.V., Zhabin S.V. Geology of mineral areas of the Murmansk Region. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2002. 359 p. (in Russian).
3. Gryadunov D., Mitrofanov E., Bubnenkov D. Use of unmanned aerial vehicles in a system of multilevel environmental monitoring. Vestnik Moskovskogo Oblastnogo Universiteta. Seria: «Estestvennienauki», 2012. No 4. P. 95–99 (in Russian).
4. 4. Medvedev A., Alekssenko N., Kuramagomedov B. Possibilities and limitations of use UAV in geographical researches. Izvestia vuzov "Geodezy and aerophotography". 2016. V. 60, No 5. P. 117–122.
5. National Atlas of Russia. Chapter 2 "Environment (Nature). Ecology". Moscow: "GOSGIST-SENTER", 2004. 495 p. web resource: www.национальный атлас.рф/cd2/index.html, accessed 01.03.2018 (in Russian).

6. *Perov V., Chernomorets S., Budarina O., Savernyuk E., Leontyeva T.* Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events. *Natural Hazards* 88. 2017. P. 199–235. DOI: 10.1007/s11069-017-2841-3.
7. *Piras M., Taddia G., Forno M.G., Gattiglio M., Aicardi I., Dabove P., Russo S.Lo. & Lingua A.* Detailed geological mapping in mountain areas using an unmanned aerial vehicle: application to the Rodoretto Valley, NW Italian Alps, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2017. 8:1. P. 137–149, DOI: 10.1080/19475705.2016.1225228.
8. *Romanenko F.A., Lukashov A.A., Shilova O.S.* Catastrophic gravitational processes on the north of the European part of Russia and an attempt of their absolute agedatin. *Geomorphology RAS*. 2011. No 1. P. 87–94. DOI: 10.15356/0435-4281-2011-1-87-94.
9. Slush flows at the Khibiny. Ed. by A.N. Bozhinsky, S.M. Myagkov. Moscow: Geographical Faculty of Moscow State University, 2001. 167 p. (in Russian).

Шумилов И.В.¹, Минервин И.Г.², Пищальник В.М.³, Терентьев Н.С.⁴

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КРОМОК ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

АННОТАЦИЯ

В работе представлено описание разработанного нового модуля к программному комплексу «ЛЁД» для вычисления на произвольную дату кромок ледяного покрова. Расчет географического положения кромок и средней кромки льда между двумя ранее построенными кромками осуществляется на основе карт-схем ледяного покрова, составляемых по спутниковым данным. В модуле реализован алгоритм, позволяющий идентифицировать кромку как набор последовательных точек, выявленных на границе между полем ледяного покрова и чистой водой. При этом для каждой точки искомой кромки определены как географические, так и декартовы координаты. Алгоритм вычисления географического местоположения кромок льда заключается в последовательном переборе всех горизонтальных и вертикальных смежных пар пикселей карты-схемы и в определении по их цветовой характеристике наличия перехода цвета с вычислением координат пограничной точки между двумя цветоразностными пикселями. Обнаружение первой точки участка кромки позволяет перейти к циклическому поиску смежных точек, подходящих под условие наличия кромки, и составлению полного списка точек данного участка. Аналогично происходит поиск всех остальных участков в пределах акватории, изображенной на карте-схеме. Вычисление географического местоположения средней кромки осуществляется методом последовательного поиска для каждой точки одной кромки соответствующей ближайшей точки другой кромки и последующим расчетом для найденных пар средней точки. Ее координаты определяются как среднее арифметическое между долготами и широтами пары ближайших точек кромок. Средняя кромка также может вычисляться рекурсивно на основе других ранее построенных средних кромок. Программный модуль позволяет производить анализ карт на наличие кромок, корректировать отдельные участки кромок перед этапом вычисления и получать результирующие текстовые файлы с упорядоченными наборами географических координат точек кромки льда. Выходные данные совместимы с ГИС, что дает возможность их дальнейшей обработки и визуализации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кромка льда, ледовые карты-схемы, ледяной покров, замерзающие моря, дистанционное зондирование Земли.

¹ Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, e-mail: ilyarolevik1@yandex.ru

² Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, e-mail: igor@minervin.ru

³ Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, e-mail: vpishchalnik@rambler.ru

⁴ Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, e-mail: terentievns@yandex.ru

Ilya V. Shumilov¹, Igor G. Minervin², Vladimir M. Pishchal'nik³, Nikolay S. Terentyev⁴

DEVELOPMENT OF THE PROGRAM MODULE FOR CALCULATION OF ICE EDGES BY THE EARTH REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

The paper describes the developed new module for the "ICE" software package for calculating the edges of the ice cover at an arbitrary date. The geographic location of the edges and the middle edge of the ice between the two previously constructed edges is calculated on the basis of ice map-charts, compiled from satellite data. The algorithm is implemented in the module allows identifying the edge as a set of consecutive points identified on the boundary between the ice cover field and clean water. For each point of the calculating edge, both geographical and Cartesian coordinates are defined. The algorithm for calculating the geographic location of the edges of ice includes the sequential search of all horizontal and vertical adjacent pairs of pixels of the map-chart and determining the presence of a color transition by their color characteristics with the calculation of the coordinates of the boundary point between two color difference pixels. Detection of the first point of the edge sector allows us to proceed to a cyclical search for adjacent points that are suitable for the edge condition and to compile a complete list of points of this sector. Similarly, all other sectors are searched all over the water area on the map. The calculation of the geographic location of the middle edge is performed by the method of sequential search for each point of one edge the corresponding nearest point of the other edge and the following calculation the midpoint for the found pairs. Its coordinates are defined as the arithmetic mean between the longitudes and latitudes of the pair of nearest edge points. The middle edge can also be calculated recursively based on other previously constructed middle edges. The software module allows to analyze maps for the existence of edges, to correct individual sectors of the edges before the calculation stage and to obtain the resulting text files with ordered sets of geographic coordinates of the ice edge points. The output data is compatible with GIS, which allows further processing and visualization.

KEYWORDS: ice edge, ice map-charts, ice cover, freezing seas, Earth remote sensing.

ВВЕДЕНИЕ

Технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют производить мониторинг ледяного покрова и получать данные для составления ледовых карт-схем, содержащих информацию о площадях, покрытых льдом различной сплоченности и других гидрометеорологических характеристиках [Плотников, 1998; Якунин и др., 1998; Митник и др., 2015]. Одной из задач мониторинга и анализа ледовых условий является определение местоположения кромок льда – границ между льдом и чистой водой [WMO, 1970], что имеет важное значение при обеспечении безопасности судоходства и морских работ и является актуальной задачей для замерзающих водоемов.

Разработанный в Сахалинском Государственном Университете программный комплекс «ЛЁД» (ПК «ЛЁД») предназначен для изучения ледового режима с использованием данных ДЗЗ для расчета площади и объема морского льда в различных пространственно-временных масштабах в районах с произвольными границами [Пищальник и др., 2015;

¹ Sakhalin State University, Lenin str., 290, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, *e-mail*: ilyarolevik1@yandex.ru

² Sakhalin State University, Lenin str., 290, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, *e-mail*: igor@minervin.ru

³ Sakhalin State University, Lenin str., 290, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, *e-mail*: vpishchalnik@rambler.ru

⁴ Sakhalin State University, Lenin str., 290, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, *e-mail*: terentievns@yandex.ru

Шумилов и др., 2017]. С целью дальнейшего расширения возможностей ПК «ЛЁД» был разработан дополнительный отдельный модуль для вычисления местоположения кромок льда в географических координатах на определённую дату с функцией вычисления средних кромок для произвольного временного периода.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (номер для публикаций: 5.9510.2017/8.9).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расчет положения кромок производится на основе карт-схем ледяного покрова, в том числе, публикуемых в открытом доступе на официальном сайте Японского метеорологического агентства (JMA) [www.jma.go.jp] (рис. 1). Карты-схемы JMA составляются на основе спутниковых снимков с космических аппаратов NOAA и MTSAT с пространственным разрешением до 1 км в надире, публикуются в оперативном режиме в период с декабря по май два раза в неделю и представляют изображения формата GIF в универсальной полярной стереографической проекции (UPS) с разрешением 640 x 448 пикселей. После конца ледового сезона формируется и публикуется коллекция пентадных (раз в пять дней) архивных карт-схем с разрешением 512 × 512 пикселей. Ледяной покров на примере карты-схемы акватории Охотского и Японского морей представляется в цветовой гамме градаций сплоченности по шкале WMO [WMO, 1970] на фоне пространства чистой воды, выделенной синим цветом. Это позволяет однозначно идентифицировать кромку льда, как границу ледяного покрова и чистой воды, представленную как набор упорядоченных точек с географическими координатами.

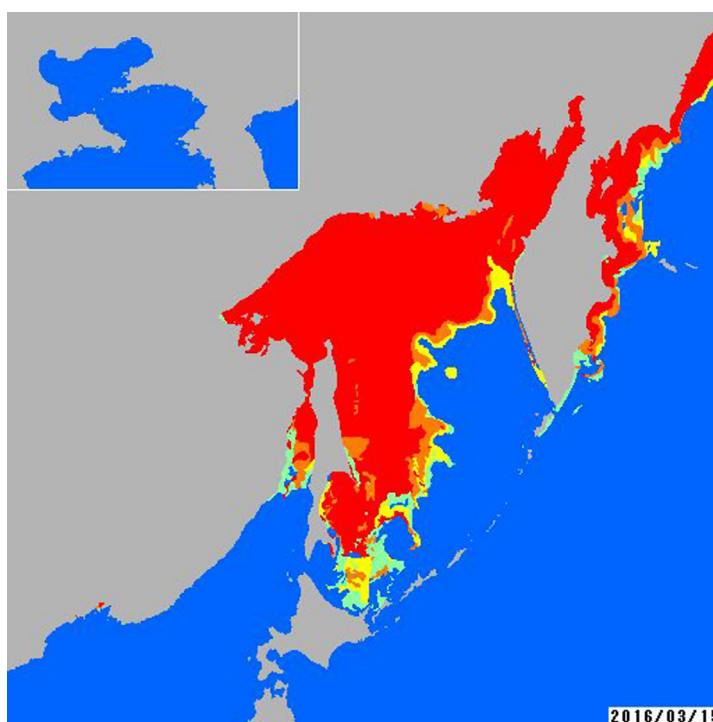


Рис. 1. Пример карты-схемы JMA на 15 марта 2016 г.

Fig. 1. An example of the JMA map-chart on March 15, 2016

Для разработки программного модуля вычисления кромок льда была использована интегрированная среда Visual Studio Community 2015. Модуль написан на объектно-ориентированном языке программирования C# с применением технологии Windows Forms.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для однозначного определения местоположения точек, образующих кромку льда, устанавливается соответствие между декартовыми координатами изображения и географическими координатами. Для карт-схем ЖМА это координаты в универсальной полярной стереографической проекции UPS [Вахрамеева и др., 1986]. Начальная точка декартовых координат устанавливается в левом верхнем углу карты-схемы.



Рис. 2. Принцип поиска точек кромки льда

Fig. 2. The principle of finding the points of the ice edge

Для идентификации точек кромки льда используется цветовая характеристика пикселей карты-схемы: в цикле производится поочередное сравнение цветов соседних пикселей карты по горизонтали и по вертикали (рис. 2). В процессе перебора выделяются пары пикселей, подходящие под условие наличия кромки – цвет одного из пикселей соответствует открытой водной поверхности, другого – морскому льду (любой сплоченности). Таким образом происходит вычисление начальных точек участков линии кромки. Точкой, принадлежащей линии кромки, принимается точка, лежащая на середине границы сравниваемых пикселей.

При обнаружении первой точки участка кромки происходит дальнейшее построение данного участка. Для этого в процедуре поиска точек производится поочередная проверка смежных точек, которые могут являться продолжением данного участка кромки (рис. 2, 3).

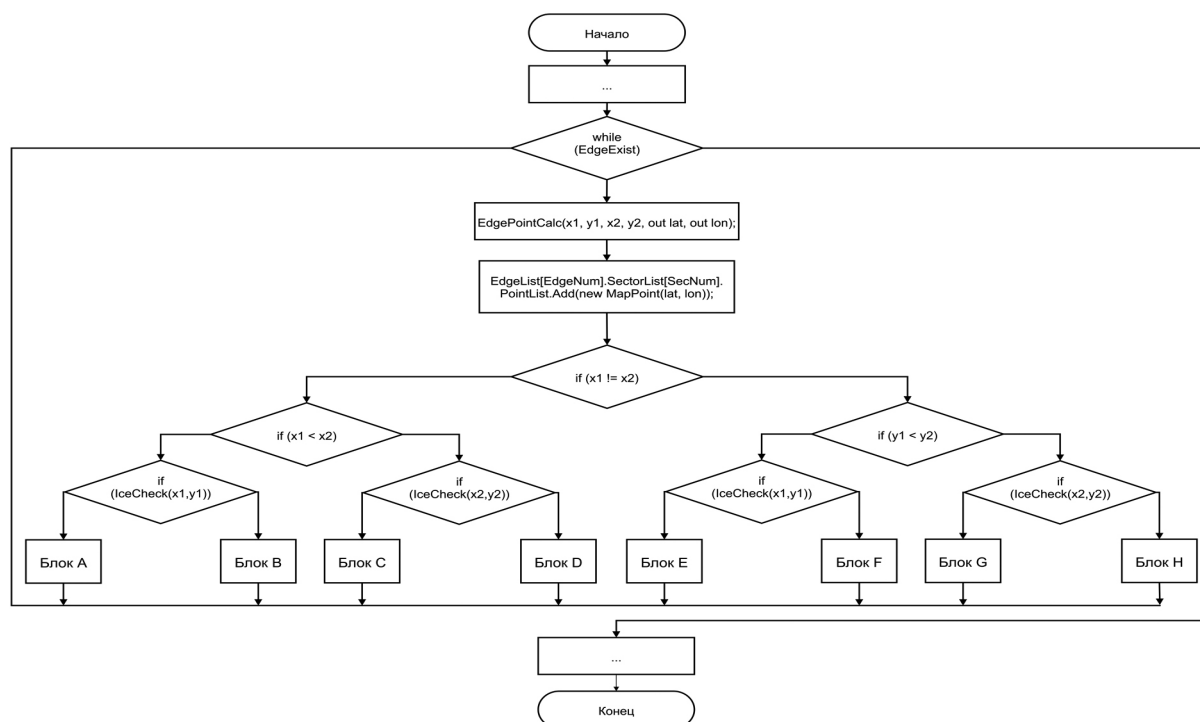


Рис. 3. Блок-схема фрагмента процедуры поиска точек участка кромки льда

Fig. 3. Block diagram of the part of the procedure for finding points of the ice edge sector

В блоках А-Н процедуры производится перебор смежных точек в соответствии с вариантом расположения пары пикселей – горизонтально (А, В, С, D) или вертикально (Е, F, G, H), области, покрытой льдом – слева (А, С), справа (В, D), сверху (Е, G) или снизу (F, H), а также области поиска кромки – вверх (А, В) или вниз (С, D), справа (Е, F) или слева (G, H) (см. рис. 2, 3). Обход смежных точек производится по или против часовой стрелки, в зависимости от перечисленных условий. Операции поиска производятся циклично до момента нахождения всех точек участка кромки. В ходе поиска их координаты переводятся из декартовых в географические и последовательно записываются в список точек участка кромки.

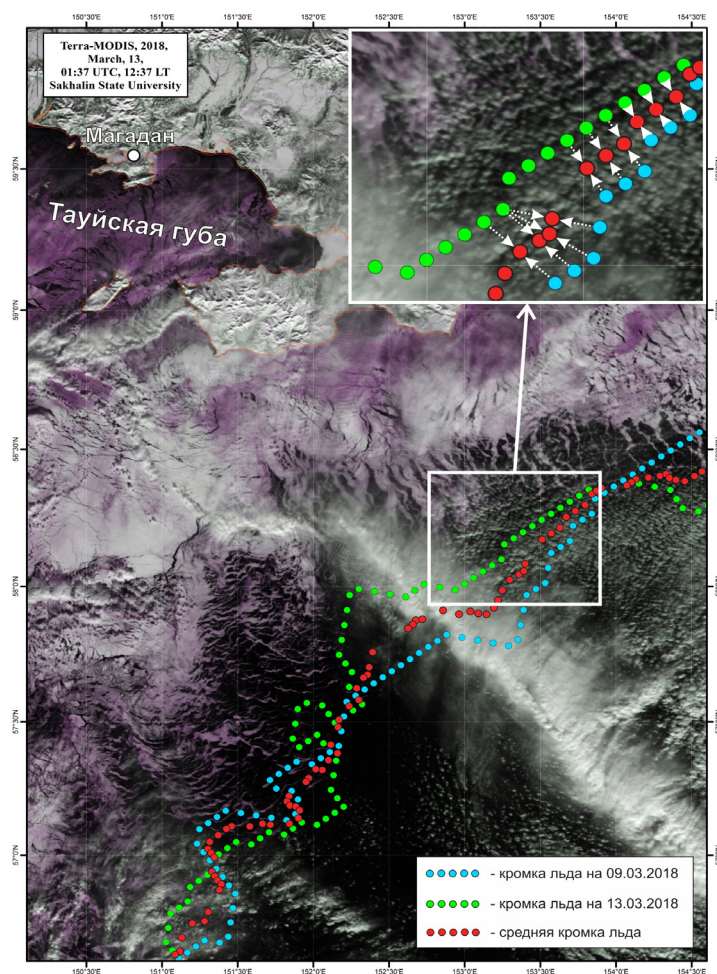


Рис. 4. Полученные в результате обработки в программном модуле ледовых карт-схем кромки льда, наложенные на спутниковый снимок Terra-MODIS
 Fig. 4. The ice edges resulting from processing ice map-charts in program module and placed on the Terra-MODIS satellite image

Все обнаруженные точки кромки исключаются из дальнейшей проверки во избежание лишних расчетов. Аналогично производится поиск других участков на всей исследуемой акватории. Результатом обработки изображения является список участков кромки льда, представленных упорядоченными наборами точек с географическими координатами (рис. 4).

Расчет средней кромки льда между различными датами может осуществляться для любых отдельных участков всей кромки путем выбора по запросу. Вычисление средней кромки между различными датами производится методом последовательного перебора: для каждой точки одной кромки находится ближайшая к ней точка, принадлежащая дру-

гой кромке (см. рис. 4). Расстояние между точками определяется в градусной мере по модифицированной формуле сферической тригонометрии (1) [Гараевская, Малюсова, 1976].

$$S = \arctan \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \varphi_2 \sin \Delta\lambda)^2 + (\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta\lambda)^2}}{\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta\lambda} \right\} \quad (1)$$

где φ_1, φ_2 – широты обеих точек в радианах, $\Delta\lambda$ – разница долготы обеих точек в радианах.

При обнаружении ближайшей точки производится расчёт географических координат средней точки между рассматриваемой точкой первой кромки и ближайшей к ней точкой второй кромки путём вычисления среднего арифметического между соответствующими координатами широты и долготы двух рассматриваемых точек по формулам (2) и (3).

$$\varphi_{cp} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}, \quad (2)$$

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}, \quad (3)$$

где φ_{cp} и λ_{cp} – соответственно, широта и долгота средней точки.

Вследствие особенностей географической системы координат возникает искажение расстояния с севера на юг, в результате чего образуется ошибка вычисления средней кромки и не превышает 1 % от расстояния между рассматриваемыми ближайшими точками кромок. В результате вычислений составляется набор упорядоченных точек средней кромки с географическими координатами (см. рис. 4). Средняя кромка может вычисляться как на основе фактических данных, полученных при обработке ледовых карт-схем, так и рекурсивно между другими, ранее рассчитанными средними кромками.

В результате обработки ледовых карт-схем координаты точек кромок льда импортируются из модуля ПК «ЛЁД» в текстовый файл (.txt). Первая строка включает заголовки столбцов, а последующие содержат информацию о каждой точке кромки: порядковый номер точки; координаты широты и долготы; число, указывающее на порядковый номер участка кромки, к которому относится данная точка. Столбцы отделяются друг от друга разделителями-табуляциями. Сформированная таблица совместима с программными продуктами ГИС для дальнейшей обработки.

ВЫВОДЫ

1. Впервые был разработан электронный инструмент для расчета кромок ледяного покрова замерзающих морей по данным ДЗЗ, который может использоваться для оперативного мониторинга и режимных исследований ледяного покрова.

2. Результирующие файлы с данными о положении кромки легко импортируются в ГИС для визуализации, дальнейшей обработки и анализа.

На основе разработанной методики планируется создание электронного атласа кромок Охотского и Японского морей в современный период глобального потепления. Методика построения кромки льда может быть использована при построении моделей ледовых прогнозов с учетом других метеорологических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вахрамеева Л.А., Бугаевский Л.М., Казакова З.Л. Математическая картография: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 286 с.
2. Гараевская Л.С., Малюсова Н.В. Практическое пособие по картографии. М.: Недра, 1976. 302 с.

3. Митник Л.М., Трусенкова О.О., Лобанов В.Б. Дистанционное радиофизическое зондирование океана и атмосферы из космоса: достижения и перспективы (обзор) // Вестник ДВО РАН. 2015. № 6. С. 21–22.
4. Пищальник В.М., Бобков А.О., Минервин И.Г., Романюк В.А. Основные принципы работы программного комплекса «Лёд» // Физика геосфер: Девятый Всерос. симп., 31 августа – 4 сентября 2015 г., г. Владивосток, Россия: материалы докл. / Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 556–561.
5. Плотников В.В. Ледовые условия и методы их прогнозирования / В.В. Плотников, Л.П. Якунин, В.А. Петров // Проект «Моря». Гидрология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. С. 291–340.
6. Шумилов И.В., Пищальник В.М., Минервин И.Г. О новой версии программного комплекса «ЛЕД» // ИнтерКарто/ИнтерГИС 23. Материалы Междунар. конф. М.: Изд-во Московского университета, 2017. Т. 2. С. 250–256. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-250-256.
7. Якунин Л.П., Плотников В.В., Петров А.Г. Ледовые условия // Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VIII. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. С. 347–394.
8. WMO Sea-Ice Nomenclature. Geneva, 1970. WMO # 259. TP. 145. P. 1. E-3–E-8.

REFERENCES

1. Garaevskaya L.S., Malyusova N.V. Practical guide to cartography. M.: Nedra, 1976. 302 p. (in Russian).
2. Mitnik L.M., Trusenкова O.O., Lobanov V.B. Remote radiophysical sensing of the ocean and atmosphere from space: achievements and prospects (overview). Vestnik DVO RAN. 2015. No 6. P. 21–22 (in Russian).
3. Plotnikov V.V. Ice conditions and methods for predicting them. V.V. Plotnikov, L.P. Yakunin, V.A. Petrov. Project "The Seas". Hydrology and hydrochemistry of the seas. V. IX. Sea of Okhotsk. Issue 1. Hydrometeorological conditions. SPb.: Gidrometeoizdat, 1998. P. 291–340 (in Russian).
4. Shumilov I.V., Pishchalnik V.M., Minervin I.G. About the new version of the software complex "Ice". InterKarto/InterGIS 23. Materialy Mezhdunar. Konf. M.: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 2017. V. 2. P. 250–256. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-250-256 (in Russian).
5. Vahrameeva L.A., Bugaevskij L.M., Kazakova Z.L. Mathematical Cartography: textbook for Universities. M.: Nedra, 1986. 286 p. (in Russian).
6. WMO Sea-Ice Nomenclature. Geneva, 1970. WMO # 259. TP. 145. P. 1. E-3–E-8 (in Russian).
7. Yakunin L.P., Plotnikov V.V., Petrov A.G. Ledovye usloviya. Project "The Seas". Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. V. VIII. Japanese Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions. SPb.: Gidrometeoizdat, 1998. P. 347–394.

Кислякова Н.А.¹, Варфоломеев А.Ф.², Манухов В.Ф.³

ИЗУЧЕНИЕ ОЧАГОВ ПОЖАРОВ И ГАРЕЙ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены возможности применения специализированных программных продуктов Erdas Imagine 9.1 и ArcGIS 9.2. с целью исследования некоторых природных и антропогенных факторов на основе космической информации. В частности, описывается технология привязки космических снимков, дешифрирование очагов лесных пожаров, подсчет площадей выгоревших участков. Была проведена геометрическая коррекция снимка, которую выполняют для того, чтобы сферическое изображение земной поверхности было корректно представлено на плоскости и имело метрические свойства карты. С этой целью необходимые координаты были получены при помощи сервиса Google Earth, в котором снимки представлены в общемировой системе координат WGS-84. Далее используемое в работе изображение было трансформировано в СК-42 (система координат 1942 г.) при помощи программного пакета Erdas Imagine v.9.1.

Была опробована возможность использования алгоритма кластерной классификации космического снимка, заложенная в программе Erdas Imagine v.9.1 с целью изучения распознавания гарей. В статье используются возможности геоинформационного сервиса по оперативному мониторингу пожаров на территории Российской Федерации – ScanEx Fire Monitoring Service (SFMS), который предоставляет доступ к спутниковым данным низкого, среднего и высокого пространственного разрешения. Используется бесплатный и свободный доступ к космическим данным, реализуемый через популярный ресурс Google Earth и российский портал «Пожары – Космоснимки».

Описанная в работе технология позволяет выявлять зарождающиеся очаги лесных пожаров, оперативно отслеживать распространение огня с целью обеспечения безопасности людей, а впоследствии оценивать ущерб, нанесенный лесному хозяйству страны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космические снимки, информационные и геоинформационные технологии, интернет-ресурсы, аэрокосмическая подготовка.

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, ул. Большевикская, 68, 430005, Саранск, Россия, *e-mail:* varfol_nata@mail.ru

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, ул. Большевикская, 68, 430005, Саранск, Россия, *e-mail:* alex_varfol@mail.ru

³ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, ул. Большевикская, 68, 430005, Саранск, Россия, *e-mail:* manuhov@mail.ru

Natalia A. Kislyakova¹, Alexander F. Varfolomeev², Vladimir F. Manukhov³

STUDY OF HOTSPOTS AND CINDERS IN THE WESTERN PART OF THE REPUBLIC OF MORDOVIA USING SPACE INFORMATION

ABSTRACT

The possibilities of using specialized software products Erdas Imagine 9.1 and ArcGIS 9.2 are considered with the aim of studying some natural and anthropogenic factors based on space information. In particular, the technology of linking space images, deciphering foci of forest fires, counting the areas of burnt out areas is described. A geometric correction of the image was performed, which is carried out in order that the spherical image of the earth's surface was correctly represented on the plane and had the metric properties of the map. To this end, the necessary coordinates were obtained using the Google Earth service, in which the images are represented in the global WGS-84 coordinate system. Then the image used in the work was transformed into SK-42 (1942 coordinate system) using the Erdas Imagine v. 9.1 software package. The possibility of using the algorithm of cluster classification of a space image, incorporated in the program Erdas Imagine v. 9.1, was studied with the aim of studying the recognition of burnout. The article uses the capabilities of the geo-information service for rapid fire monitoring in the Russian Federation – ScanEx Fire Monitoring Service (SFMS), which provides access to satellite data of low, medium and high spatial resolution. Free and free access to space data is realized through the popular Google Earth resource and the Russian portal "Fires – Cosmos". The technology described in the work allows us to identify the incipient fires of forest fires, quickly monitor the spread of fire in order to ensure the safety of people, and subsequently assess the damage to forestry in the country.

KEYWORDS: space images, information and geoinformation technologies, Internet resources, aerospace training.

ВВЕДЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли, получаемые со спутников, являются источником получения объективной информации для решения различных задач в области природопользования. Потребность в ДДЗ возникает, прежде всего, при исследовании негативных изменений окружающей среды и мониторинге природных и антропогенных процессов, в том числе при мониторинге лесных пожаров.

По информации РИА «Новости» за период с 1 апреля по 10 ноября 2010 г. в РФ примерно 2,8 млн га площадей, покрытых лесом, пройдено огнем, в том числе леса Республики Мордовия (РМ).

Нами была поставлена задача выявления очагов пожаров на западную часть территории РМ, так как именно здесь расположено большинство лесных массивов республики. Также были проведены дешифрирование и подсчеты площадей сгоревших участков леса.

¹ National Research Mordovian State University, Bolshevistskaya str., 68, 430005, Saransk, Russia, *e-mail:* varfol_nata@mail.ru

² National Research Mordovian State University, Bolshevistskaya str., 68, 430005, Saransk, Russia, *e-mail:* alex_varfol@mail.ru

³ National Research Mordovian State University, Bolshevistskaya str., 68, 430005, Saransk, Russia, *e-mail:* manuhov@mail.ru

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время в сети Интернет имеется большой объем информации о космических съемках поверхности Земли. Прежде всего это каталоги, позволяющие бесплатно получить информацию о наличии снимков определенного типа данной территории. Как правило, в таких каталогах представлены снимки низкого и среднего пространственного разрешения.

Снимки позволяют не только выявлять различные явления и объекты, но и оценивать их количественно [Данюлис, 1989].

Применение космоснимков и их компьютерная обработка стали стимулом прогресса в области исследования геосистем. Снимки дают возможность оперативно и регулярно получать информацию об объектах и их взаимосвязях, а также процессах, происходящих на поверхности Земли [Глебова, 2004; Долганина, 2015].

Источником оперативной и объективной информации о пожарной обстановке является спутниковая съемка Земли. Летом 2010 г. был создан геоинформационный сервис по оперативному мониторингу пожаров на территории Российской Федерации – ScanEx Fire Monitoring Service (SFMS), который предоставляет доступ к спутниковым данным низкого, среднего и высокого пространственного разрешения. Бесплатный и свободный доступ к космическим данным реализуется через популярный ресурс Google Earth и российский портал «Пожары – Космоснимки» [<http://fires.kosmosnimki.ru/>] [Пупышева, Морозов, 2010]

Для решения поставленной задачи с сайта fires.kosmosnimki.ru был скопирован космический снимок на исследуемую территорию (рис. 1) на 4 августа 2010 г. При первом взгляде на снимок можно выделить несколько очагов пожаров (синие контуры). Красными контурами на снимке представлены административные границы субъектов РФ.

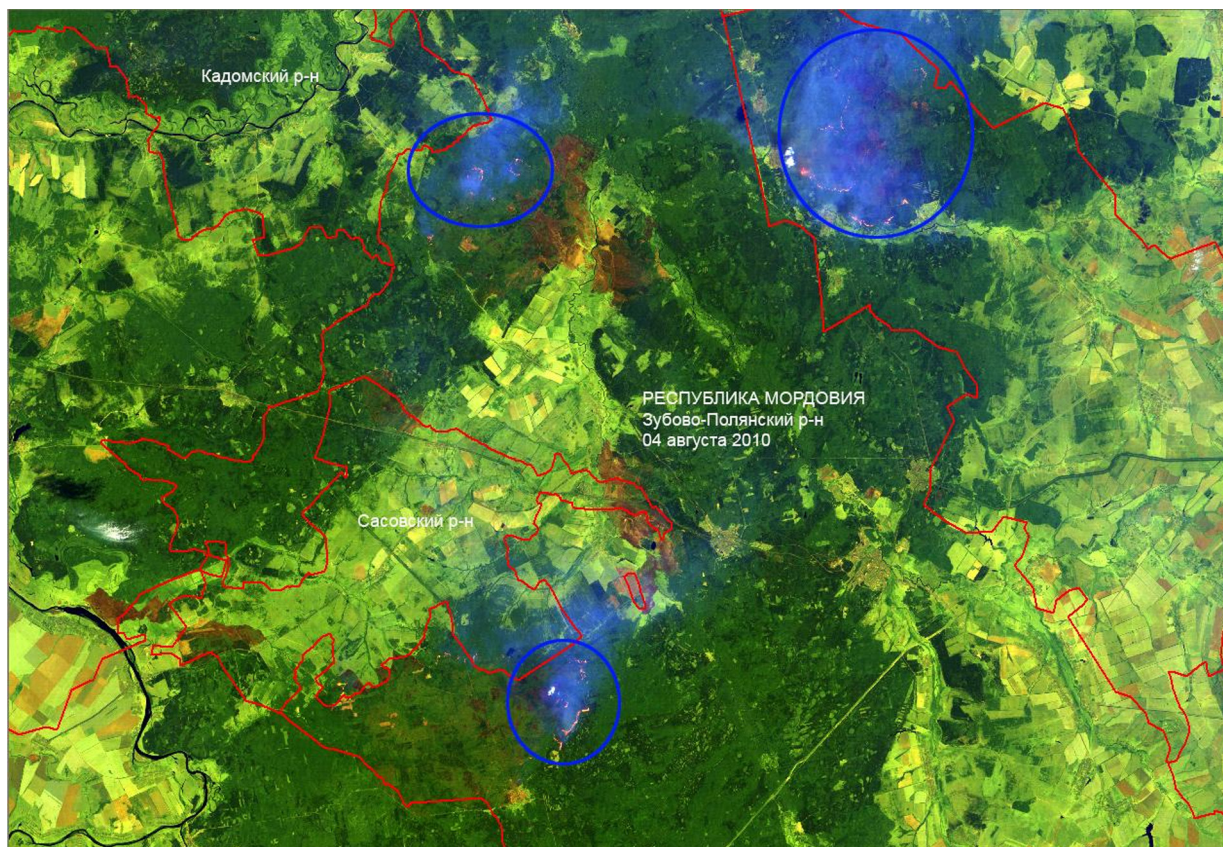


Рис. 1. Космический снимок изучаемой территории. Landsat-5, 04.08.2010, разрешение 30 м
Fig. 1. Space image of the study area. Landsat-5, 04.08.2010, resolution 30 m

Затем проводилась геометрическая коррекция снимка, которую выполняют для того, чтобы сферическое изображение земной поверхности было корректно представлено на плоскости и имело метрические свойства карты. С этой целью необходимые координаты были получены при помощи сервиса Google Earth, в котором снимки представлены в общемировой системе координат WGS-84.

Для этого использовались четыре контрольные точки, в качестве которых были выбраны легко опознаваемые на изображении твердые контуры местности (перекрестки дорог, гидросеть, границы сельскохозяйственных угодий и др.). Координаты этих точек были получены в проекте Google Earth путем наведения курсора на выбранную точку.

Далее представленное изображение было трансформировано в СК-42 (система координат 1942 г.) при помощи программного пакета Erdas Imagine v.9.1.

Пересчет координат из одной системы в другую был выполнен при помощи картографического калькулятора (Coordinate Calculator), встроенного в программу Erdas Imagine, меню Tools. При пересчете указываются параметры входных (Input) и выходных (Output) данных: проекция, эллипсоид и др. Для входных данных устанавливались тип проекции Geographic (Lat/Lon) и эллипсоид WGS-84, а для выходных данных Gauss Kruger и Krasovsky соответственно. Единицы измерения программа определяет автоматически: градусы для первой проекции и метры для второй [Манухов, 2009].

Как на исходном, так и на трансформированном снимке можно оперативно распознать зарождающиеся очаги лесных пожаров по дыму и открытому огню. Для более точного дешифрирования гарей была проведена классификация, заложенная в программном обеспечении (ПО) Erdas Imagine [ERDAS Field Guide, 1999].

На данном этапе проводилась неконтролируемая классификация. Были заданы начальные условия: входной и выходной файлы, число классов и итераций. Классификация проводилась по следующим параметрам: 7 классов и 5 итераций; 15 классов и 6 итераций; 25 классов и 7 итераций; 39 классов и 9 итераций (рис. 2).

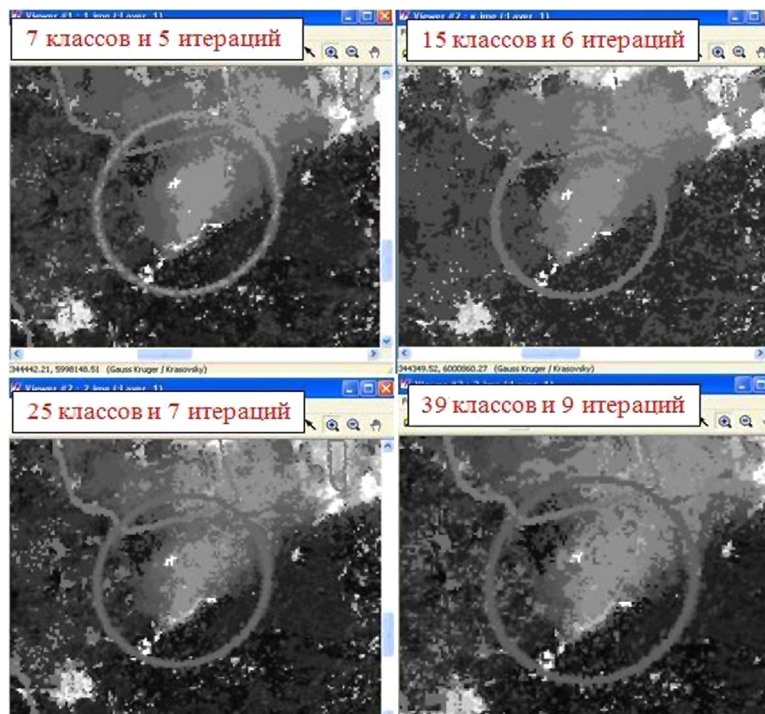


Рис. 2. Реализация автоматической классификации средствами программы Erdas Imagine
Fig. 2. Implementation of automatic classification by means of Erdas Imagine

На полученных классифицированных изображениях не представляется возможным уверенно дешифровать участки, поврежденные огнем, так как этому препятствует задымление. Тем не менее, очаги возгорания можно рассмотреть. Для этого достаточно установить минимальные параметры для проведения неконтролируемой классификации. В данном случае – это 7 классов и 5 итераций.

Поврежденные огнем участки леса на момент проведения съемки (4 августа 2010 г.) были выявлены методом визуального дешифрирования. Чтобы свести к минимуму дымовую завесу при визуализации снимка использовались только синий и зеленый каналы снимка (рис. 3).

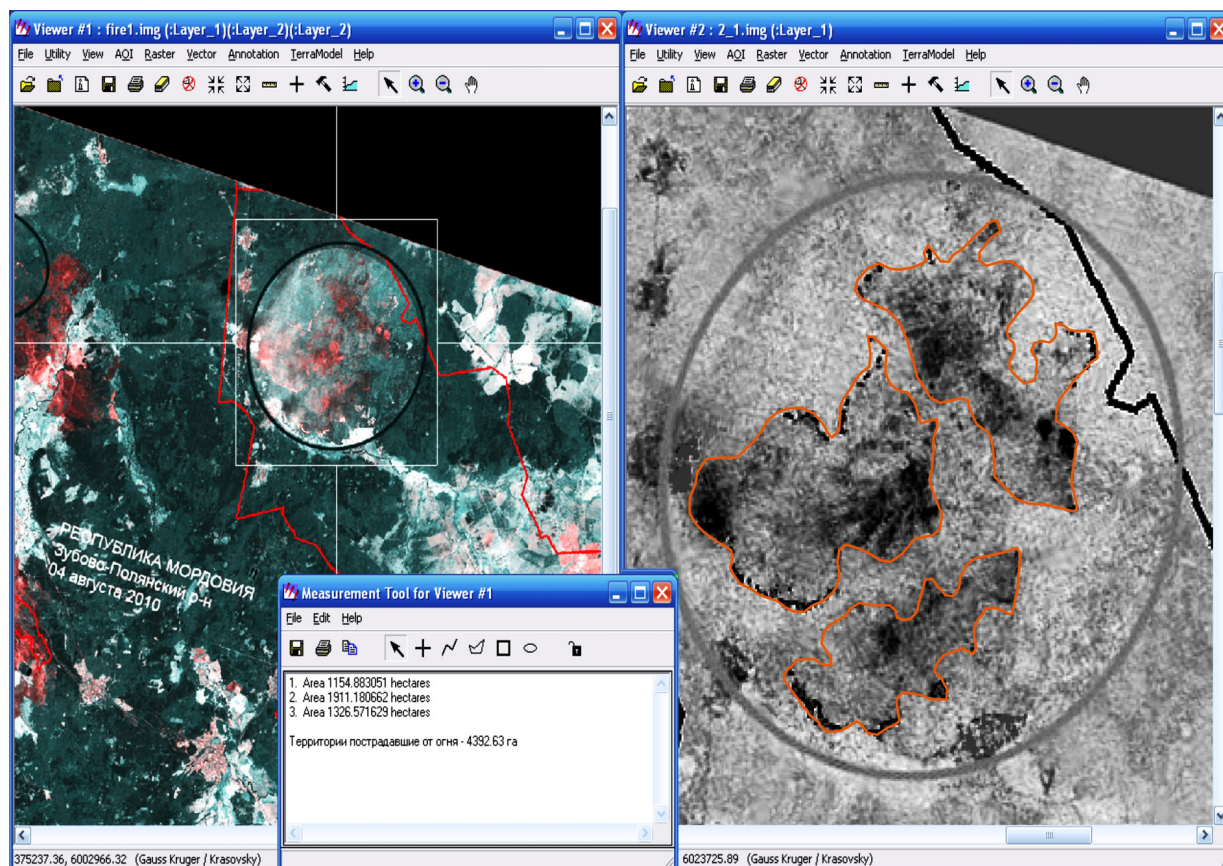


Рис. 3. Подсчет площади выгоревших лесов

Fig. 3. Calculation of the area of burnt forests

Далее были оцифрованы пострадавшие от лесных пожаров территории и подсчитаны их площади. В качестве примера на рис. 3 представлен один из участков снимка. Здесь представлена северная часть Торбеевского района РМ, в которой 4392,63 га леса были повреждены огнем.

Дальнейшее исследование было проведено с использованием программного обеспечения ArcGIS 9.2. В проекте ArcMap были объединены все материалы исследования: исходный снимок (см. рис. 1), результат неконтролируемой классификации, контуры выгоревших участков леса, а также добавлена административные границы районов РМ. В отдельные темы были выделены очаги возгорания и стены огня. В данный проект был добавлен снимок LANDSAT-5 с сервиса glovis.usgs.gov на ту же территорию за месяц до пожаров. Совмещение оцифрованных площадей выгоревших лесов с этим снимком, показывает, что наибольший ущерб был нанесен хвойным породам леса (рис. 4).

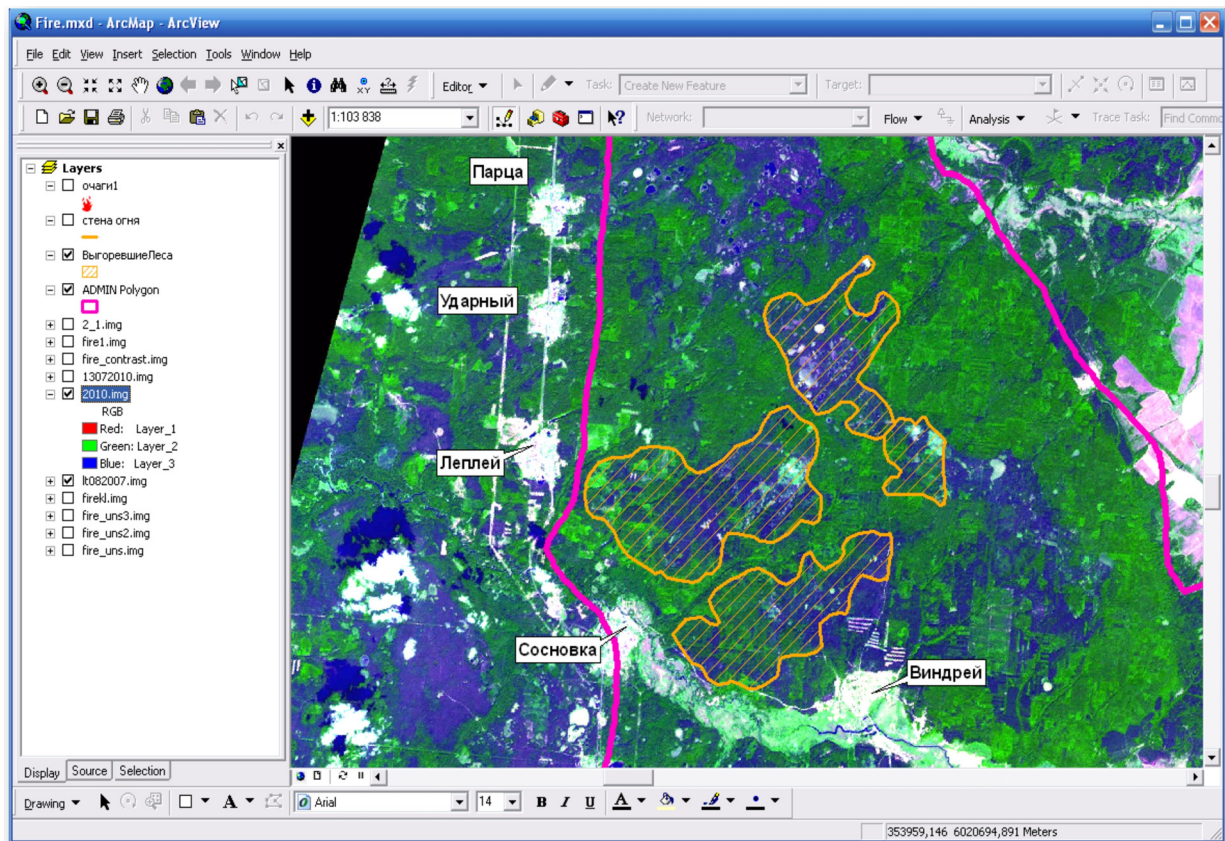


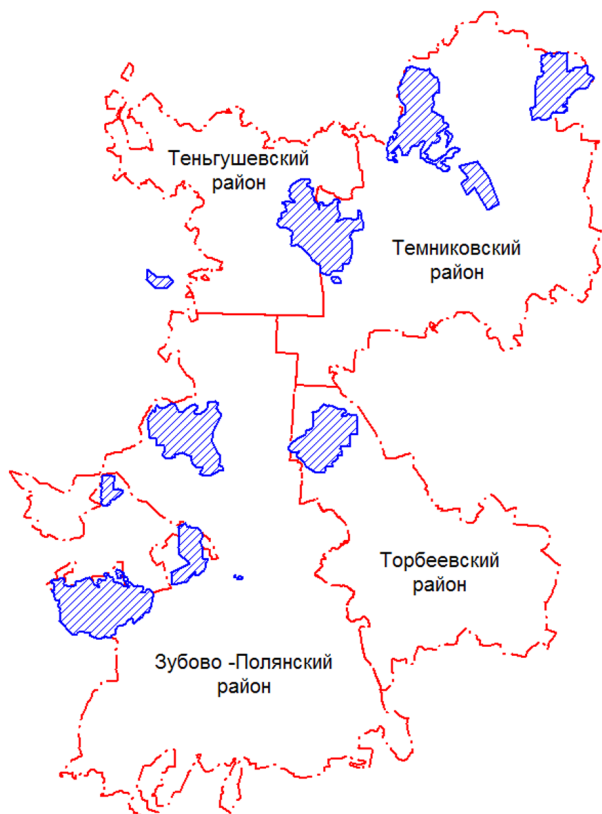
Рис. 4. Оцифрованные участки, пострадавшие от пожара (оранжевые контуры)

Fig. 4. Digitized sites affected by fire (orange contours)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На заключительном этапе исследования с сайта <http://fires.kosmosnimki.ru> были скопированы снимки на октябрь 2010 г. с выгоревшими участками от пожаров, и по технологии, описанной выше, привязаны в используемую систему координат. Далее, при помощи программного обеспечения MapInfo Professional 10.0, была оцифрована территория западной части Республики Мордовия и подсчитана площадь лесных пожаров на октябрь 2010 г. Она составила 64 800 га, что для республики является очень большим показателем. Результат дешифрирования показан на рис. 5.

Рис. 5. Площади выгоревших участков в западной части Республики Мордовия
Fig. 5. Areas of burnt out plots in the western part of the Republic of Mordovia



ВЫВОДЫ

Описанная в работе технология позволяет выявлять зарождающиеся очаги лесных пожаров. При помощи функций Erdas Imagine можно оперативно рассчитать площади открытого огня. А при своевременном поступлении информации (космической или аэросъемки) появляется возможность наблюдения за распространением стихийного бедствия в среде ArcGIS. Следовательно, обеспечивается возможность быстрого реагирования с целью обеспечения безопасности людей. Также программная среда ArcGIS может стать основой геоинформационного обеспечения для оценки ущерба, нанесенного лесному хозяйству страны, и ведения контроля восстановления лесных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варфоломеев А.Ф., Коваленко А.К., Манухов В.Ф. ГИС для оценки природных и антропогенных факторов при территориальном природопользовании // ИнтерКарто9: ГИС для устойчивого развития территорий. Материалы Междунар. конф. 2003. С. 173–178.
2. Вдовин Е.С., Каверин А.В., Стволкова Е.Н. Сравнительная оценка лесистости на территориях Республики Мордовия и Марий Эл по результатам классификации спутниковых снимков LANDSAT // ИнтерКарто/ИнтерГИС. 2015. Т. 21. С. 433–438. DOI : 10.24057/2414-9179-2015-1-21-433-438.
3. Глебова Н. Image Analysis for ArgGIS – работа с растровыми изображениями. ARCREVIEW. 2004. № 3.
4. Данюлис Е.П., Жиринов В.М., Сухих В.И., Эльман Р.М. Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве. М.: Агропромиздат, 1989. 210 с.
5. Долганина М.Ю., Манухов В.Ф. Обработка данных дистанционного зондирования Земли в программе ScanEx Image Processor [Электронный ресурс] / М.Ю. Долганина // Огарев-online. 2015. № 24.
6. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учебное пособие для студентов вузов. М.: АспектПресс, 2004. 184 с.
7. Манухов В.Ф., Варфоломеев А.Ф., Варфоломеева Н.А. Использование космической информации в процессе учебно-исследовательской деятельности студентов // Геодезия и картография. 2009. № 7. С. 46–50.
8. Пунушева Н.В., Морозов В.В. Ежедневный спутниковый мониторинг пожарной обстановки в России // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2010. № 9. С. 65–71.
9. ERDAS Field Guide. ERDAS, Inc. Atlanta, Georgia. 1999. 672 с.

REFERENCES

1. Danyulis E.P., Zhirin V.M., Sukhikh V.I., Elman R.M. Remote sensing in forestry. Moscow: Agropromizdat, 1989. 210 p. (in Russian).
2. Dolganina M.Y., Manukhov V.F. Processing of remote sensing data in the ScanEx Image Processor. Ogarev-online. 2015. No 24 (in Russian).
3. ERDAS Field Guide. – ERDAS, Inc. Atlanta, Georgia. 1999. 672 p.
4. Glebova N. Image Analysis for ArgGIS – work with raster images. ARCREVIEW. No. 3. 2004 (in Russian).
5. Labutina I.A. Decoding of aerospace images: training. manual for university students. M.: AspectPress. 2004. 184 p. (in Russian).
6. Manukhov V.F., Varfolomeev A.F., Varfolomeeva N.A. The use of space information in the process of educational and research activities of students. Geodesy and cartography. 2009. No 7. P. 46–50 (in Russian).

7. *Pupysheva N.V., Morozov V.V.* Day-to-day satellite-based monitoring of fires in Russia. Land management, cadastre and land monitoring. 2010. No 9. P. 65–71 (in Russian).
8. *Varfolomeev A.F., Kovalenko A.K., Manukhov V.F.* GIS for the assessment of natural and anthropogenic factors in the territorial use of nature. InterCarto9: GIS for the sustainable development of territories: materials of the International Conf. 2003. P. 173–178 (in Russian).
9. *Vdovin E.S., Kaverin A.V., Stvolkova E.N.* Comparative assessment of forest cover in the Republic of Mordovia and Mari El according to the results of the LANDSAT satellite images. InterCarto.InterGIS. 2015. V. 21(1). P. 433–438 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2015-1-21-433-438 (in Russian).

Коросов А.В.¹, Платонова Е.А.²

ВЫЯВЛЕНИЕ ФИТОХОР С ОБУЧЕНИЕМ НА СМЕШАННЫХ ПОЛЕВЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ (НА ПРИМЕРЕ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ БОТАНИЧЕСКОГО САДА ПетрГУ)

АННОТАЦИЯ

В работе предлагается методика совместной количественной обработки космических и полевых данных с целью выполнить тематическую классификацию пикселей спутникового снимка. В традиционном алгоритме дешифрирования классификация осуществляется отдельно от полевой верификации полученных кластеров. Предлагаемый алгоритм объединяет эти процедуры в рамках компонентного анализа. Поставлена задача выявить фитохор в растительном покрове природной территории Ботанического сада Петрозаводского государственного университета. Анализировали показатели 157 геоботанических описаний лесной растительности этой территории, в том числе: количество видов, число экземпляров деревьев четырех пород (сосны обыкновенной, ели финской, осины, березы повислой и пушистой), индекс теплообеспечения, индекс затененности и значения яркости космоснимков. Все показатели имеют количественную форму. Алгоритм анализа включает этап совмещения геоботанических описаний и яркостных характеристик тех пикселей снимков, которые покрывают площадки описаний. Совместный компонентный анализ значений яркости и геоботанических характеристик позволяет оценить вклад этих показателей в главные компоненты и выбрать по величине нагрузок, выбрать вариант фитохоры, идентифицируемый данной компонентой. Используя полученные нагрузки, рассчитываются значения компонент для всей территории. Отбор точек, соответствующих выделенным фитохорам позволяет определить узкий диапазон яркости пикселей и выполнить отбор пикселей, соответствующих искомому участку. Фитохора «монодоминантные зеленомошные, преимущественно бруснично-черничные сосняки» занимает около 17 % из всего диапазона значений компоненты. С помощью процедуры классификации с обучением на основе метода главных компонент для территории Ботанического сада ПетрГУ получена контурная карта распространения данного типа сосняков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космоснимок, классификация с обучением, компонентный анализ, фитохоры, ботанический сад ПетрГУ.

¹ Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, д. 33, 185940, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: korosov@psu.karelia.ru

² Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, д. 33, 185940, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: meles@sampo.ru

Andrey V. Korosov¹, Elena A. Platonova²

IDENTIFICATION OF PHYTOHORES WITH TRAINING ON MIXED FIELD AND SPACE DATA (USING THE EXAMPLE OF THE NATURAL TERRITORY OF THE BOTANICAL GARDEN OF PetrSU)

ABSTRACT

Joint quantitative processing of space and field data method has been proposed in order to perform thematic classification of satellite image pixels. Traditional decoding algorithm classification is carried out separately from the field verification of obtained clusters. The proposed algorithm combines these procedures in component analysis framework. The task is to identify phytohor in the vegetation cover of Petrozavodsk state University Botanical garden natural territory. The parameters of 157 geobotanical descriptions of forest vegetation of this territory were analyzed: the number of species, the number of specimens of four tree species (*Pinus sylvestris*, *Picea fennica*, *Populus tremula*, *Betula pubescens* and *Betula pendula*), heat supply index, shade index and brightness values of satellite images. Given parameters has quantitative form. The analysis algorithm includes the step of combining geobotanical descriptions and brightness characteristics of the image pixels that cover the description area. Jointed component analysis of brightness value and geobotanical characteristics allows evaluating the contribution of these parameters to the main components. By the size of the loads, phytohor variant is selected according to certain component. Using the resulting loads, component values are calculated for the entire territory. Point selection corresponding to the selected phytohors is allows to define a narrow range of pixel brightness and perform pixels selection corresponding to the desired areas. Phytohor "monodominant green-skinned, mainly cowberry-blueberry pines" occupies about 17 % of the entire range of component values. Using the classification procedure with training on the basis of the principal components method for the territory of PetrSU Botanical garden, a contour map of pine tree type distribution was obtained.

KEYWORDS: cosmonaut, classification with training, component analysis, phytochores, botanical garden PetrSU.

ВВЕДЕНИЕ

Классификация пикселей космоснимка – типичная процедура дистанционного зондирования, для которой разработано множество эффективных алгоритмов [http://grass-wiki.osgeo.org/wiki/Image_classification]. Классификация с обучением предполагает, что у исследователя есть представление о том, каким изучаемым объектам соответствуют определенные области снимка. Эти области выделяют в качестве «эталонов», и все прочие пиксели снимка классифицируются по степени близости к эталонным сигнатурам [<http://gis-lab.info/qa/grass-ismap.html>]. Так получают одноканальную растровую карту с областями. После такого предварительного районирования следует процесс ее верификации – сбор полевых данных и проверка правильности отнесения природных объектов к той или иной группе на рассчитанном растре.

В описанной процедуре есть два момента, оптимизация которых, на наш взгляд, вполне актуальна и должна приветствоваться. Во-первых, процесс назначения эталонных участков есть акт квантирования непрерывной информации, поскольку и природные

¹ Petrozavodsk State University, Lenina str., 33, 185940, Petrozavodsk, Russia, e-mail: korosov@psu.karelia.ru

² Petrozavodsk State University, Lenina str., 33, 185940, Petrozavodsk, Russia, e-mail: meles@sampo.ru

объекты и их отображение на снимке есть континуумы (особенно это касается лесных территорий). Создавая этот артефакт, мы неизбежно теряем и искажаем часть информации, совершая ошибки и первого, и второго рода. По этой причине естественным было бы уйти от назначения эталонов и непосредственно включить имеющуюся априорную (полевую) информацию в процесс классификации. Эта идея воплощена в новых методах классификации, таких как байесовский метод и максент [Phillips, 2009]. Во-вторых, если полевая информация будет сразу же включена в расчеты, отпадает этап полевой верификации, пожалуй, самый трудоемкий и неблагодарный из всех шагов районирования. Его можно будет заменить расчетными процедурами, когда для первичной классификации используется один массив данных, а для его проверки – другой.

Опираясь на эти соображения, мы предлагаем (и в настоящем сообщении рассматриваем) процедуру совместной обработки космических и полевых данных (с помощью метода главных компонент) как способа классификации пикселей космоснимка. Поставлена задача выявления фитоценозов в растительном покрове Ботанического сада Петрозаводского государственного университета. Эта территория является удобным полигоном для апробации методики, поскольку досконально изучена в геоботаническом отношении. В силу ограниченности объема публикации рассмотрена задача выделения из растительного покрова одного типа фитоценоза (в размерах таксационного выдела или фитоценоза).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Природная территория Ботанического сада площадью более 630 га располагается в денудационно-тектоническом грядовом ландшафте, который характеризуется чередованием вытянутых в северо-западном направлении гряд, сложенных вулканогенно-осадочными породами протерозоя. Маломощные морены последнего верхневалдайского оледенения залегают прерывистым чехлом и местами перекрыты песчано-гравийными озерно-ледниковыми и озерными отложениями. Растительность территории представлена в основном лесами (80 %), в которых значительную долю составляют сосняки, меньшие площади занимают еловые и сосново-еловые леса. Геоботанические описания участков леса на исследуемой территории выполнены в 1996–1997 гг. [Платонова, Лантратова, 2001] (рис. 1).

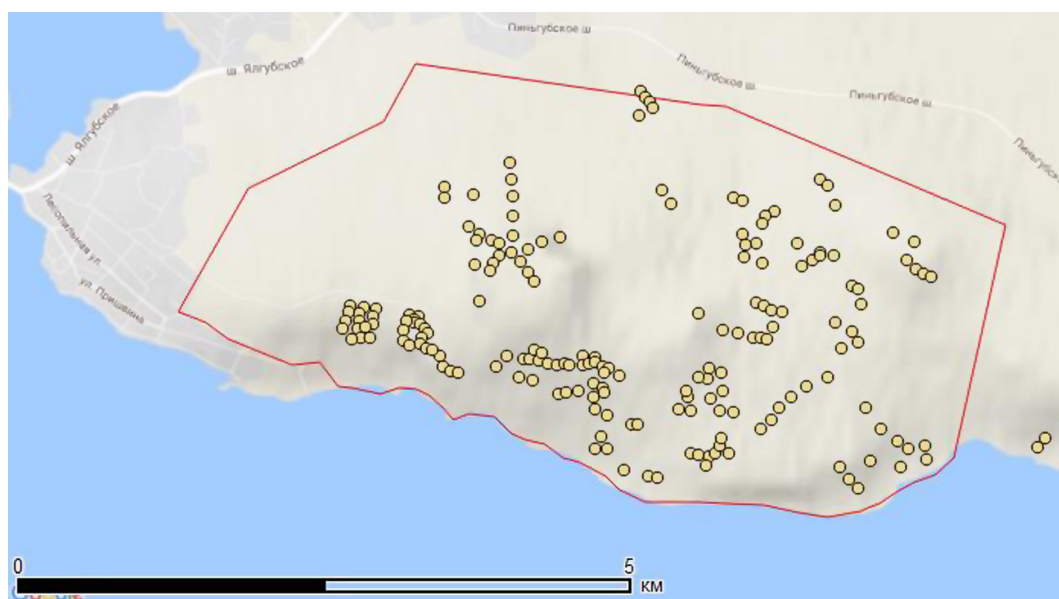


Рис. 1. Размещение точек описания на территории Ботанического сада ПетрГУ
Fig. 1. Placement of the sample plots on the territory of the Botanical Garden of PetrSU

Мы использовали следующие показатели по каждой пробной площадке (размером 0.01 га), полученные традиционными методами [Программа и методика..., 1974]:

- видовое богатство на участке (число видов, bdiv);
- число экземпляров деревьев четырех пород – сосны (psy), ели (pab), осины (ptr), березы повислой (bru) и пушистой (bre) для двух ярусов (древесного, кустарникового) (А, В);
- индекс теплообеспечения (Тм) (рассчитывался с использованием шкал Д.Н. Цыганова [1983] как средневзвешенный балл с учетом обилия видов на пробной площади);
- индекс затененности (Lc) (рассчитывался с использованием шкал Д.Н. Цыганова [1983] как средневзвешенный балл с учетом обилия видов на пробной площади).

Всего в анализ включено 157 описаний по 13 показателям.

Космоснимки были взяты с сайта [<https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html>] для безоблачных дней зимы (1993.03), весны (1995.04), лета (1993.06) и осени (1994.09). Использовались трехканальные снимки. Всего файл со значениями яркости содержал 12 столбцов (X1993.03_1...X1994.09_3).

Процедура получения отклассифицированного растра включает несколько основных этапов. Сначала выполняется отбор тех пикселей снимков, которых покрывают области с геоботаническим описанием. При этом составляется матрица, совмещающая яркостные характеристики снимка и геоботанические описания в тех же точках пространства. Затем выполняется компонентный анализ зависимости каналов снимков от геоботанических характеристик, и выбираются те компоненты, которые надежно идентифицируют разные варианты растительности, или фитохоры; компоненты получают свое геоботаническое название. На третьем этапе рассчитываются значения выбранных компонент для всех пикселей снимка. Может быть получен растровый слой, выражающий континуальное распространение значений компонент, связанных с вариантами фитохор. Поскольку компоненты однозначно идентифицированы, полученная карта сразу обретает геоботанический смысл.

Подготовка геоботанических данных выполнялась в среде MS Excel. Чтение яркостных характеристик снимков, построение окончательных карт выполнялось в среде QGIS. Компонентный анализ и расчет значений компонент для построения растрового слоя выполнялся в среде R.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Последовательно рассмотрим алгоритм анализа по этапам.

Совмещение геоботанических описаний и характеристик снимков выполнялось с помощью процедуры чтения значений яркости со снимка (Extract...) – в таблицу для заранее нанесенных точек отбора проб. Характеристики со слоев космоснимков приписываются этим точкам из тех пикселей, над которыми они находятся.

Компонентный анализ основан на коррелированности изучаемых характеристик и выражает степень их взаимозависимости в форме «факторных нагрузок» – коэффициентов из диапазона ± 1 (табл.). При этом формируются группы более тесно взаимосвязанных показателей, выраженных как отдельные главные компоненты. Общая структура корреляций как бы «нарезается» на блоки, на отдельные группы более тесно коррелирующих переменных.

Высокие значения нагрузок в одной компоненте говорят о тесной корреляции показателей. Доля от общей корреляции, учтенная данной компонентой, выражается значением дисперсии; самые важные корреляции учитываются первыми компонентами. В нашем случае первая главная компонента с дисперсией 2,6² (учитывает 25 % общей корреляции) включает практически только характеристики космоснимков, анализируя совпадение контрастов почти на всех слоях. С небольшой нагрузкой в компоненту входит первый ярус ели, что нам не интересно.

Факторные нагрузки (Loadings) и стандартные отклонения (S) в четырех первых компонентах (Comp.1...Comp.4) для показателей смешанной выборки
Factor Loadings and Standard Deviations (S) in the first four principal components
(Comp.1 ... Comp.4) for mixed sample

Нагрузки (Loadings)				
Показатель	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4
X1993.03_1	-0,26	-0,12	0,05	0,27
X1993.03_2	-0,34	0,12	-0,10	-0,02
X1993.03_3	-0,32	0,21	-0,11	0,01
X1993.06_1	-0,28	-0,11	0,18	-0,24
X1993.06_2	-0,30	-0,06	0,07	-0,28
X1993.06_3	-0,12	-0,20	0,33	0,13
X1994.09_1	-0,33	-0,09	-0,11	0,01
X1994.09_2	-0,31	-0,16	-0,13	0,14
X1994.09_3	-0,17	-0,32	0,14	0,17
X1995.04_1	-0,12	-0,15	0,18	0,42
X1995.04_2	-0,34	0,14	0,00	-0,06
X1995.04_3	-0,32	0,22	0,04	-0,14
vid_nas	-0,14	-0,28	-0,10	-0,02
Apsy	0,00	0,40	0,05	-0,09
Bpsy	-0,07	0,22	0,10	0,37
Apab	0,12	-0,32	-0,16	-0,03
Bpab	0,06	-0,06	0,12	0,31
Aptr	-0,02	-0,23	-0,03	0,05
Bptr	0,02	-0,15	-0,14	-0,12
Abpe	0,02	-0,06	-0,01	0,17
Bbpe	0,00	0,04	-0,04	0,23
Abpu	0,01	-0,18	0,41	-0,26
Bbpu	-0,01	-0,06	0,49	-0,25
Tm	-0,14	-0,08	-0,44	-0,07
Lc	0,07	-0,36	-0,24	-0,22
S	2,60	1,67	1,36	1,32

Вторая компонента с дисперсией 1,7² (12 %) имеет следующие переменные с максимальными факторными нагрузками: +0,4 доля сосны, -0,3 доля ели, -0,2 доля осины, -0,17 доля березы, -0,35 затененность; из показателей снимков высокую нагрузку несут осенние: -0,3 для 1994.09 и зимний +0,21 для 1993.03, что свидетельствует об их обратной коррелированности. Интерпретировать это можно таким образом: компонента характеризует изменчивость доли в древостое сосны, осины и березы, но с противоположными знаками – чем больше сосны, тем меньше осины и березы, и наоборот. Яркость зимних снимков с этим трендом совпадает, весенних – противоположна. Компонентный анализ использует факторные нагрузки как коэффициенты для расчета значений главных компонент. В нашем случае получается, что чем больше на площадке сосны (знак +) и меньше ели, осины, березы (знак -), тем большее значение индекса получит данное описание, т. е. тем правее на диаграмме расположится соответствующая ему точка.

Отбор точек, соответствующих соснякам, выполняется с помощью таблицы исходных данных, таблицы главных компонент и списка номеров проб. Расчеты показали, что в правой области распределения значений второй компоненты выделяется небольшая

группа с максимальными значениями $PC2 > 2$ (рис. 2). Анализ таблицы первичных данных показал, что для этих точек характерно доминирование сосны и повышенная освещенность, значит, именно они являются представителями искомым лесов. Это монодоминантные сосняки (на денудационных террасах южной экспозиции с близким залеганием и выходом на поверхность кристаллических пород) зеленомошные, преимущественно бруснично-черничные и вересковые, в небольшой доле черничные.

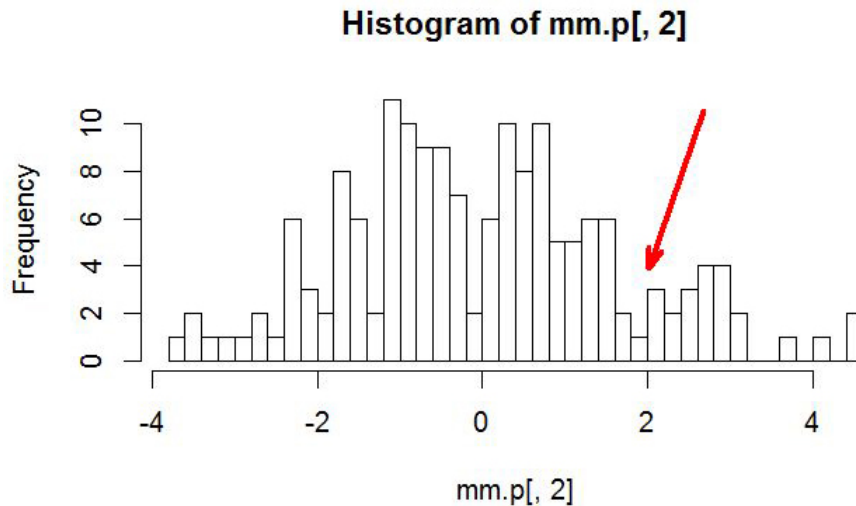


Рис. 2. Распределение значений второй главной компоненты
Fig. 2. Distribution of values of the second main component

Определение диапазона яркости пикселей, соответствующих искомым фитоценозам, выполняется в среде R. Для этого рассчитываем значения компонент, используя только нагрузки для показателей яркости (–0,12287941, 0,11977884, 0,20752337, –0,11143326, –0,05962177, –0,20098435, –0,09322922, –0,15653191, –0,31572369, –0,15108658, 0,13909984, 0,22394727). Зная номера проб, ранее отнесенных к сосновым лесам, нетрудно увидеть, что им соответствуют значения второй компоненты из диапазона –4...9 (рис. 3).

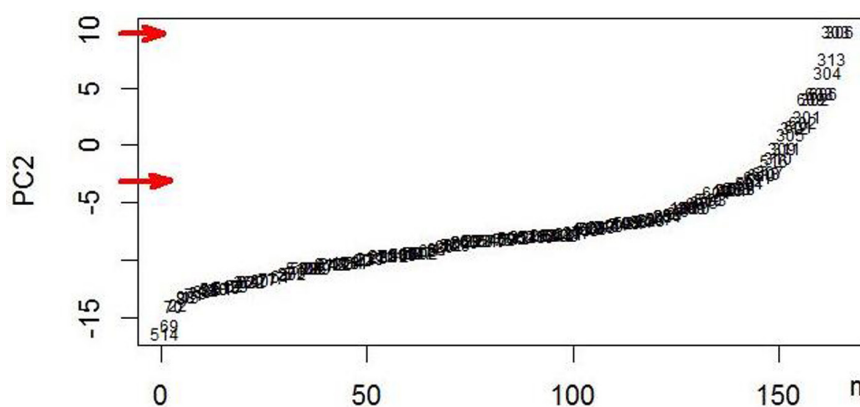


Рис. 3. Расположение проб из сосняков на оси второй главной компоненты
Fig. 3. Location of samples from pine forests on the axis of the second main component

Отбор пикселей, соответствующих соснякам, на всем снимке. Для этого с помощью калькулятора растра создается новое растровое изображение, яркость пикселей на котором рассчитывается с использованием факторных нагрузок для всех каналов. Гистограмма показывает, что искомые фитоценозы занимают на оси яркостей небольшой участок (рис. 4).

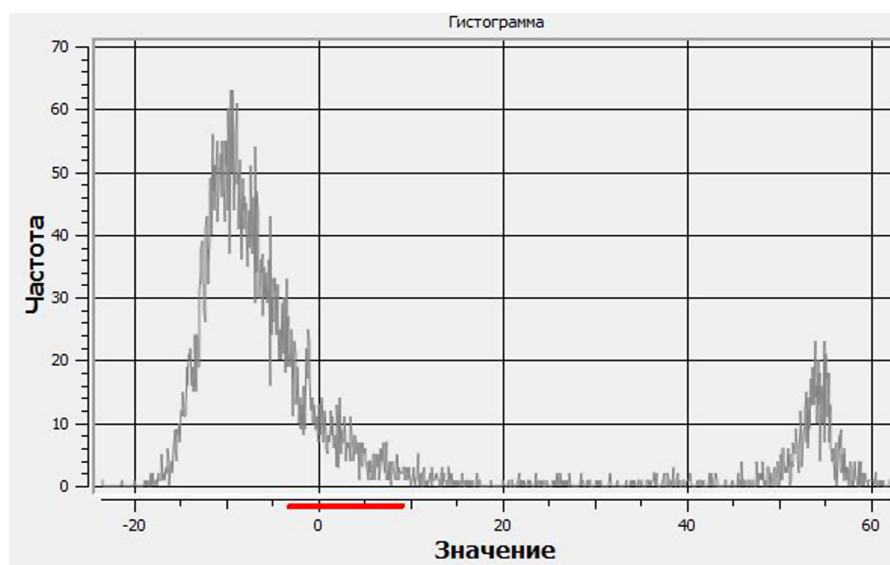


Рис. 4. Гистограмма для синтетического слоя второй компоненты
Fig. 4. Histogram for the synthetic layer of the second component

Далее с помощью калькулятора раstra из изображения вырезаются области пикселей, в которых соответствуют условию « $pc1\ 3345@1$ » > -4 and « $pc1\ 3345@1$ » < 10 ; полученный слой со значениями 0 и 1 (пиксели из заданного диапазон), отображают сосняки (рис. 5).

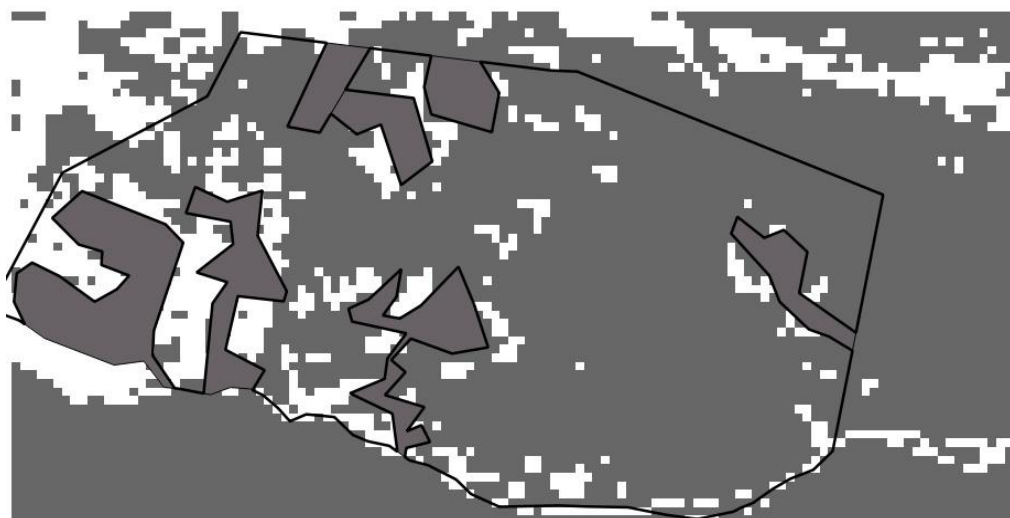


Рис. 5. Распространение выделенного варианта сосняков
в Ботаническом саду ПетрГУ (белая заливка)
Fig. 5. Distribution of identified pine phytozones
in the Botanical Garden of PetrSU (white filling)

Возможен другой вариант анализа – если привести значения яркостей к диапазону 0–1, то такой слой будет выражать метрику «вероятность быть сосняком искомого варианта для данного участка территории».

Проблема совмещения геоботанических описаний и характеристик снимков – не тривиальная задача, поскольку положение точки описания в общем смысле не совпадает с пикселем, имеющим те же координаты, в силу ошибок определения координат и точности привязки снимка. Следовательно, конкретному описанию фактически будет

соответствовать пиксель из некоторой области, которую, например, можно ограничить точностью 100 м, т. е. полем с размером 3*3 пикселя вокруг точки отбора. Это означает, что отдельное полевое описание нужно приписать не одному, а девяти ближайшим пикселям. Техническое решение таково: формируется сеть точек с шагом 30 м, из которых отбираются только те, что размещены вокруг точек отбора проб на расстоянии 50 м; атрибуты от точек описания передаются точкам гнезд. Характеристики со слоев космоснимков приписываются всем этим точкам.

Мы не рассматривали существенный этап – верификацию полученного геоизображения. Она может состоять в повторении рассмотренных процедур с *разными исходными наборами опорных точек* (пикселей, снабженных описаниями), получением серии растровых слоев и их обобщении. Вариантов обобщения может быть несколько (оценка средней, медианной или модальной яркости каждого пикселя...), в том числе расчет единственной главной компоненты по всем полученным картам, которая может рассматриваться как многомерный фильтр [Ефимов и др., 1988]. Более того, на основе исходных данных можно проводить разные варианты ресамплинга [Шитиков, Рзенберг, 2013] – выполнять множественные построения искомого растрового слоя с использованием только части информации, и получить на этой основе устойчивые статистические характеристики районирования.

К сожалению, это можно будет сделать, располагая более репрезентативным материалом, в частности, получив описания с других частей исследуемой территории. Размещение растительности на территории очень неравномерно, снимки получаются контрастными и самые сильные корреляции должны были бы проявляться по трендам – луг-лес. Пока описаний открытых территорий мало и поэтому указанный тренд точно оценить не удалось.

ВЫВОДЫ

С помощью процедуры классификации с обучением на основе метода главных компонент для территории Ботанического сада ПетрГУ получены два результата: традиционная контурная карта распространения одного из различных вариантов сосняков и континуальная карта распределения вероятности присутствия фитохоры данного типа. В целом полученная карта соответствует геоботанической карте, построенной в 2000 г. [<http://hortus.karelia.ru/>], поэтому представленный метод можно рассматривать как перспективный для районирования фитохор разного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В.М., Галактионов Ю.К., Шушпанова Н.Ф. Анализ и прогноз временных рядов методом главных компонент. Новосибирск: Наука, 1988. 70 с.
2. Платонова Е.А., Лантратова А.С. Разнообразие растительного покрова заповедной территории Ботанического сада ПетрГУ // Hortus botanicus. 2001. Т. 1. С. 42–51.
3. Программа и методика биогеоэкологических исследований / Отв. ред. Н.В. Дылис. М.: Наука, 1974. 403 с.
4. Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М., 1983. 196 с.
5. Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. Тольятти: Кассандра, 2013. 314 с.
6. Phillips S.J. A Brief Tutorial on Maxent // Network of Conservation Educators and Practitioners. Center for Biodiversity and Conservation, American Museum of Natural History. Lessons in Conservation. 2009. V. 3. P. 108–135.

REFERENCES

1. *Cyganov D.N.* Phytoindication of ecological regimes in the subzone of coniferous-broadleaf forests. M., 1983. 196 p. (in Russian).
2. *Efimov V.M., Galaktionov Yu.K., Shushpanova N.F.* Analysis and prediction of time series by the principal component method. Novosibirsk: Nauka, 1988. 70 p. (in Russian).
3. *Phillips S.J.* A Brief Tutorial on Maxent, Network of Conservation Educators and Practitioners. Center for Biodiversity and Conservation, American Museum of Natural History. Lessons in Conservation. 2009. V. 3. P. 108–135 (in Russian).
4. *Platonova E.A., Lantratova A.S.* Variety of vegetative cover of the protected area of the Botanical Garden of PetrSU, Hortus botanicus. 2001. T. 1. P. 42–51 (in Russian).
5. Program and methodology of biogeocenological research. Otv. red. N.V. Dylip. M.: Nauka, 1974. 403 p. (in Russian).
6. *Shitikov V.K., Rozenberg G.S.* Randomization and bootstrap: statistical analysis in biology and ecology using R. Tol'yatti: Kassandra, 2013. 314 p. (in Russian).

Гостева А.А.¹, Матузко А.К.², Якубайлик О.Э.³

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ИЗУЧЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В ГОРОДАХ (НА ПРИМЕРЕ г. КРАСНОЯРСКА, РОССИЯ)

АННОТАЦИЯ

Существует два способа получения данных о температуре поверхности земли. Прямой способ включает измерения, полученные непосредственно наземными методами, например, данные метеостанций, второй способ – дистанционный – включает данные спутникового дистанционного зондирования. Спутниковое дистанционное зондирование – единственное средство получения долговременных однородных рядов данных о температуре поверхности. В статье рассмотрены методы определения коэффициента излучения поверхности по данным спутникового дистанционного зондирования. Тепловое излучение является индикатором объектов, явлений и процессов, скрытых от непосредственного наблюдения.

Используя значения тепловых каналов, можно определить температуру поверхности земли. Поверхность земли из-за своей неоднородности имеет разную излучательную способность, которая определяется коэффициентом эмиссии. Самыми распространенными методами определения коэффициента эмиссии для спутникового снимка считаются: на основе нормализованного вегетационного индекса или применяя классификацию изображения. Температуру поверхности земли в нашем исследовании вычисляли в два шага, сначала для определения коэффициента эмиссии проводили классификацию изображения с выделением основных типов поверхности: почва, вода, растительность, строения. Далее, используя значения 10-го канала сканера TIRS спутника Landsat-8 и коэффициента эмиссии, вычисляли температуру поверхности земли в градусах Цельсия. Над спутниковыми данными проводилась радиометрическая и атмосферная коррекция. Было рассмотрено 10 безоблачных сцен с 2013 по 2016 г. По результатам исследования были выделены тепловые аномалии на территории г. Красноярска.

Проблема тепловых аномалий характерна для всех крупных городов мира. Спутниковые тепловые снимки являются весомым источником информации для анализа тепловых аномалий в пределах одной территории. Определение природы и границ тепловых аномалий поможет понять причины неблагоприятной экологической ситуации в исследуемом городе.

На территории г. Красноярска можно выделить два типа тепловых аномалий – природные и антропогенные. Выделены антропогенные объекты с интенсивным излучением тепла. В нашей работе такими объектами стали промышленные предприятия и торгово-развлекательные центры. Эти объекты состоят из плотных материалов с высокой теплоемкостью, таких как асфальт, бетон и железобетон, камень. Из таких материалов построена большая часть антропогенных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городской остров тепла, тепловые космические снимки, Landsat, тепловые аномалии, температура поверхности земли.

¹ Сибирский федеральный университет, ул. Киренского 26, корп. УЛК., 660074, Красноярск, Россия, e-mail: AGosteva@sfu-kras.ru

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Академгородок 50/44, 660036, Красноярск, Россия, e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

³ Институт вычислительного моделирования СО РАН, Академгородок 50/44, 660036, Красноярск, Россия, e-mail: oleg@icm.krasn.ru.

Anna A. Gosteva¹, Aleksandra K. Matuzko², Oleg E. Yakubailik³

**REMOTE METHODS IN STUDYING THE TEMPERATURE
OF THE EARTH'S SURFACE IN CITIES (ON THE EXAMPLE
OF THE CITY OF KRASNOYARSK, RUSSIA)**

ABSTRACT

There are two methods for obtaining data about the Earth surface temperature. The direct method includes measurements obtained directly by ground-based methods, like weather station data, the another is a remote method, which includes satellite remote sensing data. The satellite remote sensing is the only instrument to obtain long-term homogenous series of data about the ground temperature. The paper reviews methods of determining the surface emission coefficient based on the satellite remote sensing data. Thermal emission is an attribute of objects, phenomena, and processes, which are hidden from direct observation.

The ground surface temperature can be defined by using the values of the thermal bands. Due to its heterogeneity, the ground surface has a different emissivity, which is determined by the emissivity coefficient. The most common methods for the determining the emissivity coefficient for a satellite image are based on a normalized vegetation index or on applying an image classification. In our study the calculation of the ground surface temperature is defined in two steps. At first, in order to determine the emissivity coefficient, the classification of the image is realized by with the identification of the main types of surface: soil, water, vegetation, and buildings. Then using the values of the 10th band of the TIRS scanner of the Landsat-8 satellite and the emissivity coefficient, the ground surface temperature in Celsius degrees was calculated. The radiometric and atmospheric corrections were applied to the satellite data. 10 cloudless scenes from 2013 to 2016 has been considered. Based on the results of the study thermal anomalies were identified in Krasnoyarsk city.

The problem of the thermal anomalies is typical for all major cities of the world. The satellite thermal images are a valuable source of the information for analyzing the thermal anomalies on a selected territory. The determination of nature and boundaries of the thermal anomalies will help to understand the causes of the unfavorable ecological situation in the considered city.

On the territory of Krasnoyarsk city, the two types of the thermal anomalies can be distinguished: natural and anthropogenic. The anthropogenic objects with intense thermal emission has been outlined (or defined). In our study, plant facilities and shopping malls are such objects. These objects consist of dense materials with high heat capacities, such as asphalt, concrete, and steel. Most of the anthropogenic objects are made of such materials.

KEYWORDS: urban heat island, thermal infrared imagery, Landsat, temperature anomalies, land surface temperature.

¹ Siberian Federal University, Kirenskogo str., 26, ULK building, 660074, Krasnoyarsk, Russia, *e-mail:* **AGosteva@sfu-kras.ru**

² Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM SB RAS), Akademgorodok 50/44, 660036, Krasnoyarsk, Russia, *e-mail:* **akmatuzko@icm.krasn.ru**

³ Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM SB RAS), Akademgorodok 50/44, 660036, Krasnoyarsk, Russia, *e-mail:* **oleg@icm.krasn.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Существует два способа получения данных о температуре поверхности земли, прямой способ включает измерения, полученные непосредственно наземными методами, например, данные метеостанций, второй способ – дистанционный – включает данные спутникового дистанционного зондирования. Спутниковое дистанционное зондирование – единственное средство получения долговременных однородных рядов данных о температуре поверхности. В статье рассмотрены методы определения коэффициента излучения поверхности по данным спутникового дистанционного зондирования. Тепловое излучение является индикатором объектов, явлений и процессов, скрытых от непосредственного наблюдения.

Проблема тепловых аномалий характерна для всех крупных городов мира. Первые упоминания об изучении тепловых аномалий относятся к началу XIX в. В последние 20–30 лет стали применять данные спутникового дистанционного зондирования для изучения этого феномена.

Космические тепловые снимки являются весомым источником информации для анализа тепловых аномалий в пределах одной территории. Определение природы и границ тепловых аномалий поможет понять причины неблагоприятной экологической ситуации в Красноярске, где, помимо значительных промышленных выбросов, наблюдаются атмосферные процессы, приводящие к тому, что примеси задерживаются и концентрируются над городом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тепловые аномалии и территория исследования

Как при проведении исследований, так и в области планирования повышенное внимание уделяется взаимосвязи между использованием городских земель и качеством окружающей среды [Stone, Rodgers, 2001]. Климат города становится важнейшим предметом изучения, особенно важно понимать влияние, которое оказывают на него развивающиеся городские территории.

Застроенные области выглядят как неравномерные искусственные ландшафты со строительными материалами, частично отличными от естественных поверхностей. Кроме того, антропогенные процессы выделяют избыточное тепло и загрязняют окружающую среду. Вместе они приводят к более высокой городской температуре по сравнению с относительно естественным окружением. Температура поверхности земли является также одним из индикаторов парникового эффекта и антропогенного влияния на природные ресурсы [Асмус и др., 2005].

Эффект повышения температуры окружающей среды наблюдается в крупных городах, где температура воздуха в течение всего года на несколько градусов выше, чем за его границами. Это явление – температура воздуха в городе выше, чем температура окружающей его местности, – было открыто в 1810 г. Люком Ховардом и получило название *городской остров тепла*.

Наша работа направлена на исследование температурных особенностей Красноярска. Красноярск – крупный промышленный центр с уникальными природными и климатическими особенностями, вызванными условиями рельефа и термической неоднородностью местности. Красноярск отнесен к зоне высокого потенциала загрязнения атмосферы. Котловинный характер местности, высокая повторяемость туманов и парение над Енисеем приводят к аккумуляции вредных примесей над основной территорией города.

Красноярск находится на стыке трех геоморфологических структур: Западно-Сибирской равнины, Средне-Сибирского плоскогорья и Алтае-Саянской горной страны. Город расположен на двух берегах вдоль р. Енисей, в котловине, образованной самыми север-

ными отрогами Восточного Саяна [https://ru.wikipedia.org/wiki/Красноярск#Физико-географическая_характеристика]. Строительство Красноярской ГЭС привело к незамерзанию реки в черте города в холодный период года. Температура воздуха зимой достигает значений ниже -30°C . На формирование тепловых аномалий в городе оказывает влияние большая разница температур между незамерзающим Енисеем и окружающим пространством. В летний период температура воздуха поднимается выше 30°C , а температура воды остается около $5\text{--}7^{\circ}\text{C}$. Таким образом, взаимодействие двух эффектов тепловых аномалий в летний и зимний периоды негативно влияет на экологическую обстановку города [Хлебопрос и др., 2012].

Сеть наземных наблюдений недостаточная, так, на территории крупного промышленного города протяженностью более 30 км вдоль р. Енисей расположено всего семь государственных метеостанций, поэтому так важен поиск альтернативных методов получения информации, например, с использованием данных спутникового дистанционного зондирования для вычисления температуры поверхности земли.

Данные дистанционного зондирования Земли

Фонд материалов космической съемки в тепловом инфракрасном диапазоне накапливается с 1960-х гг. Американская программа Landsat начала свое существование в 1972 г., с этого времени было запущено семь спутников. Собранный архив снимков позволяет анализировать изменения, произошедшие на Земле на протяжении уже более 40 лет. Технологии получения информации дистанционными методами совершенствовались в качестве пространственного и температурного разрешения. В феврале 2013 г. состоялся запуск современного спутника Landsat-8, который получает данные, используя два различных сенсора – Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS).

Сканер TIRS был создан в центре NASA Goddard Space Flight Center и предназначен для получения изображений в дальнем ИК. В фокальной плоскости TIRS установлены фотодатчики Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) на базе GaAs [<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-8-ldcm>]. Сканер теплового диапазона TIRS ведет съемку в двух каналах 10,6–11,2 мкм (10 канал) и 11,5–12,5 мкм (11 канал) с пространственным разрешением 100 м, что позволяет анализировать по ним энергию самой земной поверхности, а не отражение солнечного света.

Определение температуры поверхности земли

По значениям тепловых каналов можно определить температуру поверхности земли. Поверхность земли из-за своей неоднородности имеет разную излучательную способность, которая определяется коэффициентом эмиссии. Метеорологические станции измеряют температуру воздуха в 2 м над землей, а с помощью спутниковых систем вычисляется непосредственно температура поверхности. Теоретически точность оценки температуры около $0,5^{\circ}\text{C}$, однако дымка в атмосфере занижает значения на несколько градусов [www.wiki.gis-lab.info/w/Коррекция_материалов_Landsat]. Исходными данными для определения температуры служат значения интенсивности излучения, пришедшего на сенсор спутника и зарегистрированного соответствующим тепловым каналом. На основе значений этих тепловых каналов вычисляем значение температуры поверхности земли, используя формулу [Weng et al., 2004].

$$T = \frac{T_B}{1 + (\lambda \frac{T_B}{C_2}) \ln(e)} \quad (1)$$

T_B – температура спектральной яркости излучения (К);

λ – длина волны света, $\lambda = 10,8 \mu\text{m}$ для 10-го канала Landsat-8;

$C_2 = h \cdot c / k = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{m K} = 14388 \mu\text{m K}$;

e – коэффициент эмиссии.

В настоящее время есть два основных метода для определения коэффициента эмиссии по спутниковым данным. В первом методе пользователь применяет классификацию объектов на изображении, где каждому классу присваивается конкретное значение коэффициента излучения. Во втором методе коэффициент эмиссии определяется на основе индекса NDVI. Первый метод более простой в использовании, но его точность ограничена и находится в прямой зависимости от эффективности результатов классификации снимка.

Рассмотрим первый метод подробнее. Первым шагом является определение типа поверхности, вся территория разделяется на четыре класса: вода, открытая почва, растительность и строения. После классификации изображения каждому классу соответствует значение коэффициента эмиссии, которое представлено в табл. 1 (используемые значения являются ориентировочными [Congedo, 2017, p. 278], поскольку коэффициент излучения каждого материала должен быть получен из полевого обследования).

Таблица 1. Значение коэффициента эмиссии для разных видов поверхности земли
Table 1. The value of the emission for different types of the Earth's surface

Тип поверхности	Открытая почва	Трава/растительность	Строения	Вода
Значение ϵ	0,928	0,982	0,942	0,98

Второй метод имеет более высокую точность и позволяет вычислять коэффициент излучения поверхности по каждому пикселю изображения [Ле Хунг Чинь, 2015, с. 59]. Рассмотрим второй метод определения коэффициента излучения на основе нормализованного вегетационного индекса.

Правильное определение температуры поверхности ограничивается точным знанием коэффициента эмиссии. Взаимосвязь между температурой поверхности земли и NDVI учитывает, что растительность и почвы являются основным поверхностным покрытием [Giannini, 2015, p. 85].

$$\epsilon = a + b \cdot \ln(\text{NDVI}), \quad (2)$$

где $a = 1,0094$ и $b = 0,04$, значения получены регрессионным анализом [Brivio et al., 2006].

Для определения NDVI используются красные области спектра и ближние инфракрасные области спектра:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}}, \quad (3)$$

где ρ_{NIR} – отражение в ближней инфракрасной области спектра и ρ_{RED} – отражение в красной области спектра.

В нашей работе для определения температуры поверхности будет применяться первый метод вычисления коэффициента эмиссии. Для его реализации потребуется провести атмосферную коррекцию и классификацию поверхности земли. Этот метод учитывает разнообразие городских территорий и требует меньше операций, чем второй метод.

Исходные данные

Материалами для исследования тепловых особенностей территории города Красноярска является 10 сцен Landsat-8. Отобрано 10 безоблачных сцен в бесснежный период с 2013 по 2016 г.: 07.10.2016, 05.09.2016, 10.06.2016, 23.04.2016, 17.07.2015, 01.07.2015, 08.06.2015, 14.05.2015, 07.07.2014, 18.06.2013.

Температура поверхности земли вычисляется по данным спутникового дистанционного зондирования, с использованием значений 10-го канала Landsat-8, прошедших этап радиометрической и атмосферной коррекции. Вычисления выполнены в свободно

распространяемом программном обеспечении QGIS 2.18.1 Для проведения атмосферной коррекции спутниковых данных и дальнейших вычислений используется плагин Semi-Automatic Classification Plugin (SACP) [Congedo, 2017, p. 278].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температура поверхности земли вычисляется по формуле 1. Полученные значения температуры переведены в градусы Цельсия, и на основе этих значений для каждой даты съемки составлена температурная карта поверхности земли, например, 10 июня 2016 г. (рис. 1).

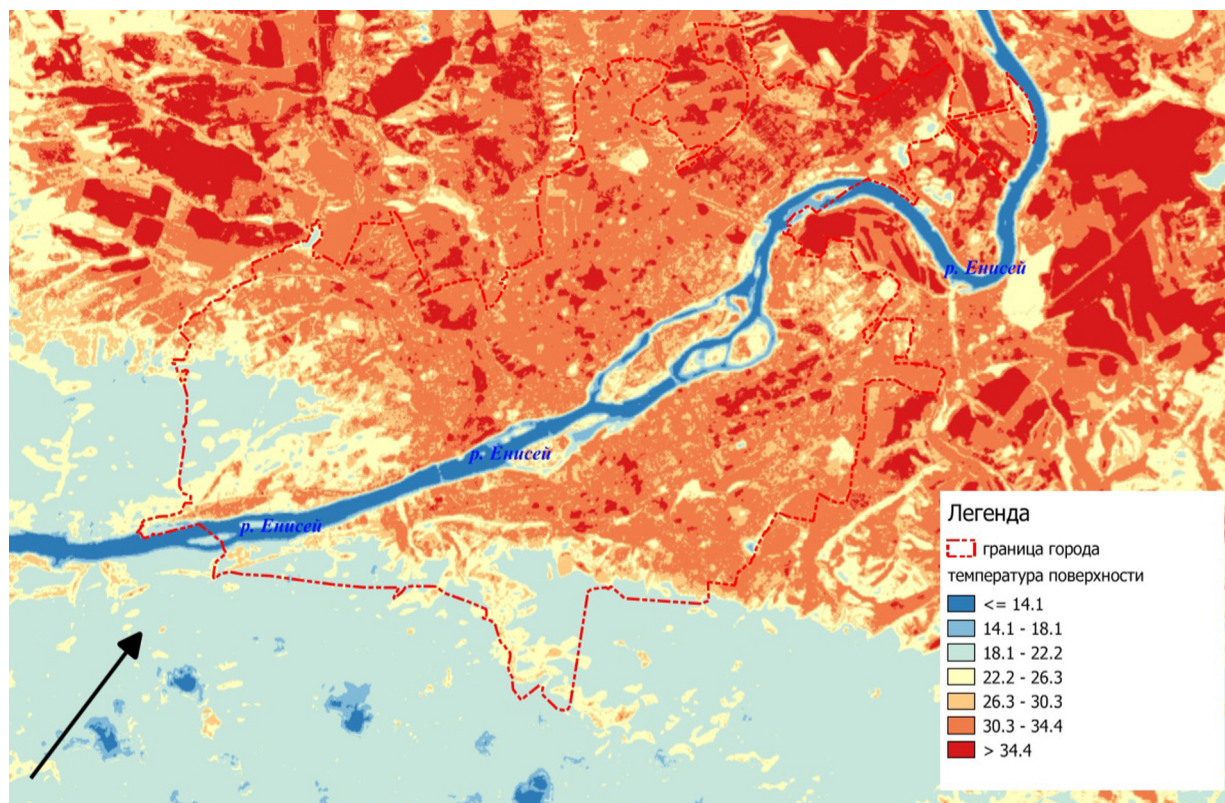


Рис. 1. Температура поверхности земли, г. Красноярск (10.06.2016)

Fig. 1. Surface Temperature of the Krasnoyarsk city (10.06.2016)

На рис. 1 видно, что температура реки значительно ниже, чем температура поверхности городских территорий, лесов и гор. Такая низкая температура воды обусловлена строительством гидроэлектростанции на р. Енисей, в 27 км от Красноярска, что оказало большое влияние на распределение сезонных температур в городе и его пригородах [Hrebtov, Nanjalić, 2017, p. 469].

Изменения теплового режима реки в результате строительства гидротехнических сооружений по сравнению с природными условиями влияют на работу не только самой гидроэлектростанции, но и объектов управления водными ресурсами, водного транспорта, а также качество воды и климат. Независимо от периода годового цикла характерные изменения температуры воды происходят ниже по течению. А именно, температура воды в Енисее в районе г. Красноярска летом на 8–10 °С ниже, чем до регуляции реки, и, наоборот, увеличивается на 4–5 °С в осенние месяцы, что создало определенные трудности в развитии прилегающей территории и оказало значительное влияние на климат Красноярска [Матушко, 2017, с. 272].

Для нахождения максимальных температурных значений в пределах города все снимки были распределены по трем сезонам: лето (10.06.2016, 17.07.2015, 01.07.2015, 08.06.2015, 07.07.2014, 18.06.2013), весна (23.04.2016, 14.05.2015) и осень (07.10.2016, 05.09.2016). Границы тепловых аномалий были сформированы для весенних, летних и осенних снимков, в данной работе будут описаны результаты обработки летних снимков, так как они составляют наиболее полный временной ряд, в отличие от единичных снимков за весенний и осенний сезоны. С целью оценки применения спутниковых снимков для определения температуры сравнивались значения температуры поверхности земли и температуры воздуха в трех точках города, где расположены автоматические метеостанции (АМС). Температура, представленная в таблице, зафиксирована на АМС в 12 часов дня, что максимально приближено ко времени пролета спутника Landsat-8 над г. Красноярском (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение значений, полученных по АМС и по спутниковым изображениям
Table 2. Comparison of data obtained on AWS and on the satellite image

Дата	По данным АМС в 12 часов, °С			На снимке, °С		
	Дудинская 4	Минусинская 14	Роев Ручей	Дудинская 4	Минусинская 14	Роев Ручей
10.06.16	25	23,4	26,1	33	25	28
17.07.15	24,6	23	26	34	24	29
01.07.15	30,4	28	30,9	34	29	29
08.06.15	24	22,6	24,9	30	25	27
07.07.14	29,1	27,3	30,3	32	27	31
18.06.13	29,9	27	21,1	33	34	21

Разница между значениями, полученными с АМС, и спутниковыми данными обусловлена тем, что на АМС измеряют значения температуры на высоте 2 м от поверхности земли, а в случае спутниковых данных вычисляется непосредственно температура поверхности земли.

Для каждого летнего снимка были сформированы тепловые аномалии. Далее, чтобы определить тепловые аномалии города, были найдены множественные пересечения аномалий по шести летним снимкам и сформирован полигональный слой аномалий.

Аномалии формировались из участков, где температура поверхности земли выше на 5–8°, чем средняя температура поверхности. При формировании границ тепловых аномалий аномалии размером до 100 × 100 м были удалены для устранения единичных артефактов при спутниковой съемке, например, небольшие строения с металлическими крышами могут создавать дополнительные тепловые аномалии. Полученные максимальные температурные значения представлены на рис. 2.

В полученной карте летних максимальных температурных значений на территории г. Красноярска можно выделить два типа тепловых аномалий – природные и антропогенные. Хорошо различимы аномалии на природных возвышенностях с южной и юго-западной экспозицией склона, например, в Железнодорожном районе г. Красноярска наибольшую температуру поверхности имеет Караульная гора с негустым покрытием склона растительностью.

Отдельно от природных стоит рассмотреть аномалии, которые возникают в результате антропогенного преобразования окружающей среды. Чаще всего они формируются возле торгово-развлекательных центров и в промышленных кварталах города. Рассмотрим некоторые из аномалий подробнее.



Рис. 2. Летнее распределение максимальных температурных значений
Fig. 2. Summer distribution of maximum temperature values

На рис. 3 показана территория возле Железнодорожного вокзала, где наблюдаются аномалии на железнодорожных путях и на территории неработающего Комбайнового завода.

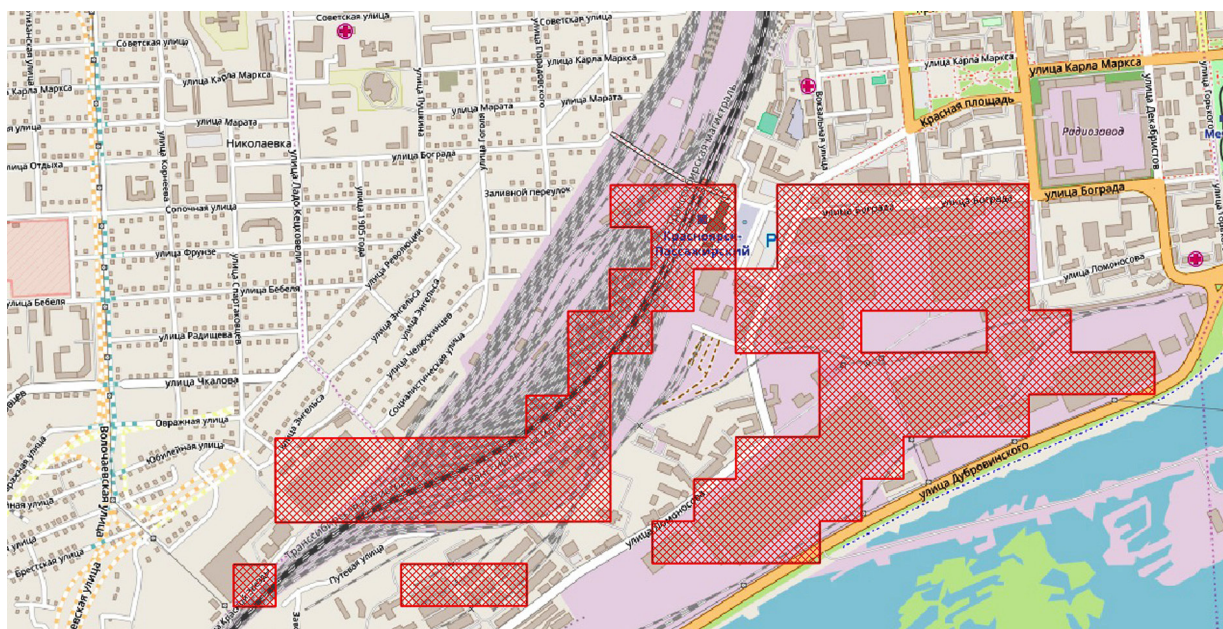


Рис. 3. Окрестности железнодорожного вокзала г. Красноярска
Fig. 3. Krasnoyarsk railway station and its surroundings

На рис. 4 изображены тепловые аномалии, наблюдаемые на правом берегу Енисея в г. Красноярске, они находятся там, где преобладает промышленная зона: Красноярский машиностроительный завод, ТЭЦ-1, Сибирский завод тяжелого машиностроения.

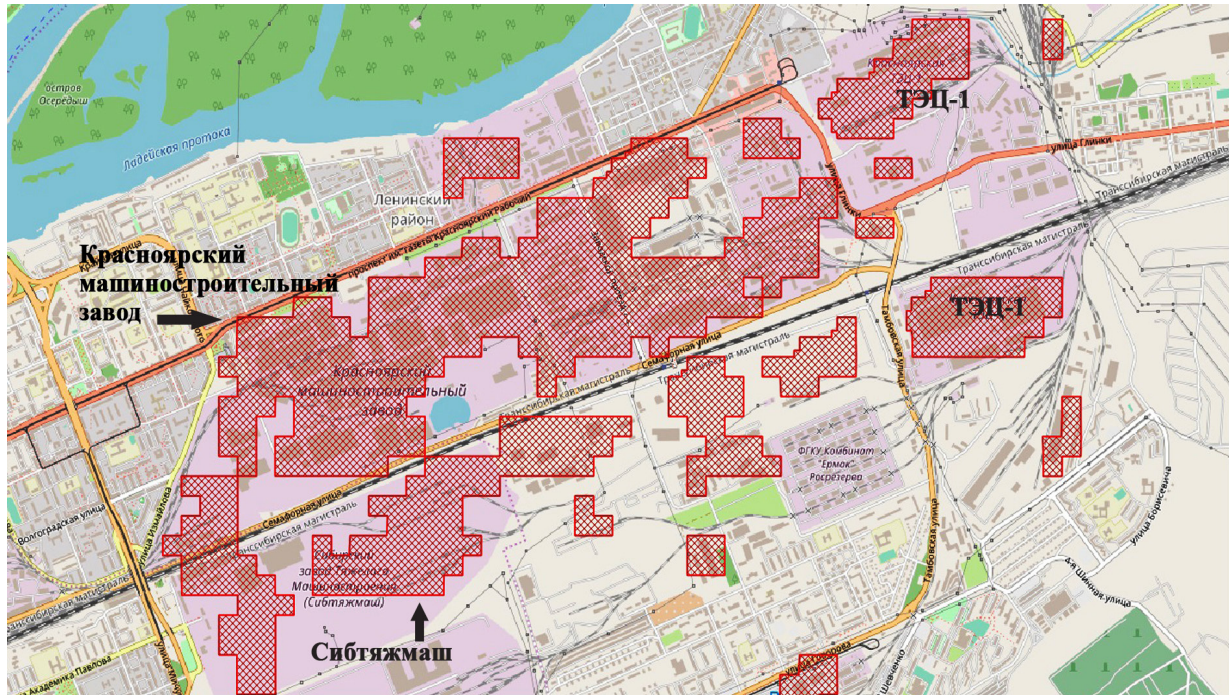


Рис. 4. Промышленная зона, правый берег Енисея, г. Красноярск

Fig. 4. Industrial zone on the right bank of Yenisei River

В Советском районе города, расположенном на левом берегу, максимальные температуры преобладают в промышленной зоне города, а также в местах скопления торгово-развлекательных центров. На рис. 5 отмечены тепловые аномалии, которые соответствуют торгово-развлекательным центрам: ТРЦ «Планета», Гипермаркет «Лента», ТРЦ «Июнь», Автосалоны (Тойота центр Красноярск, Порше центр Красноярск, Ауди центр Красноярск, Форд центр Красноярск), ТЦ «Авиатор», ТК «Командор».

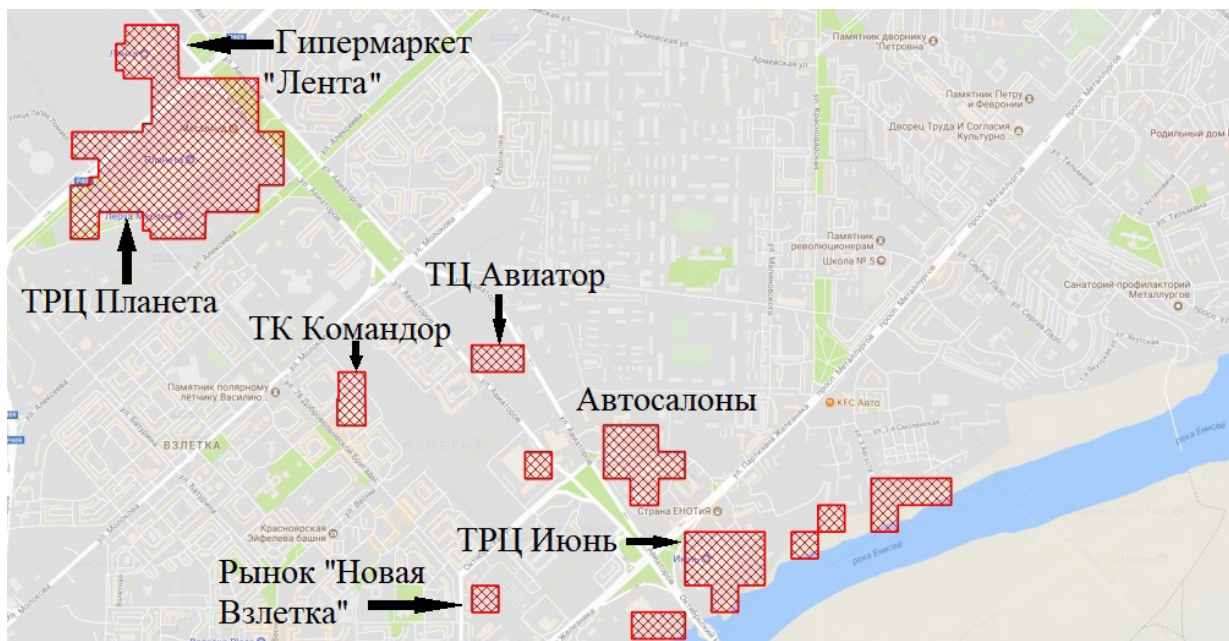


Рис. 5. Советский район г. Красноярск

Fig. 5. Sovetsky district of the Krasnoyarsk city

Описанные тепловые аномалии указывают на тепловое загрязнение города, которое можно определить по данным спутникового дистанционного зондирования. Поэтому важно правильно выбрать методику для определения температуры поверхности земли, на основе которой выявляются тепловые аномалии. В работе описаны две методики определения коэффициента эмиссии, необходимого для вычисления температуры поверхности земли. Определение коэффициента эмиссии проводилось с использованием классификации изображения по типам поверхности земли.

Карты тепловых аномалий информативно составлять на территории с большим количеством объектов с интенсивным излучением тепла. В нашей работе такими объектами стали промышленные предприятия и торгово-развлекательные центры. Эти объекты состоят из плотных материалов с высокой теплоемкостью, таких как асфальт, бетон и железобетон, камень. Из таких материалов построена большая часть антропогенных объектов (жилые дома, производственные помещения, торгово-развлекательные центры), которые образуют тепловые аномалии. Чем больше площадь поверхности таких объектов, тем интенсивнее будет излучение и, следовательно, больше влияние на окружающую среду.

ВЫВОДЫ

В работе был произведен расчет температуры поверхности земли для 10 безоблачных сцен Landsat-8 с 2013 по 2016 г. Расчет производился в два шага, для определения коэффициента эмиссии выбран метод с определением типа поверхности пользователем при классификации изображения. На втором шаге вычислялась температура поверхности земли с использованием значений температуры спектральной яркости излучения и коэффициента эмиссии. Анализ полученных значений температуры поверхности земли позволил сформировать границы тепловых аномалий. Для дальнейшего анализа территории города были сформированы летние тепловые аномалии. Летние тепловые снимки отличаются наибольшей информативностью: по ним выявляются промышленные объекты, жилые кварталы, лесные массивы, водные объекты, участки открытого грунта.

При анализе снимков были найдены тепловые аномалии на территории промышленных зон, ландшафтных возвышенностей и аномалии, соответствующие расположению и форме торгово-развлекательных центров. Особый интерес в г. Красноярске, на левом и правом берегах Енисея, представляют промышленные зоны вследствие своей обширной площади. Сформированные тепловые аномалии являются ценным материалом для дальнейших эколого-географических исследований территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асмус В.В., Дядюченко В.Н., Загребаев В.А. и др. Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации // Тр. НИЦ «Планета». 2005. Вып. 1 (46). С. 3–21.
2. Ле Хунг Чинь, Терехин Э.А., Зань Туен Ву. Дистанционные методы в изучении коэффициента излучения поверхности по данным многозональной съемки LANDSAT (на примере района Бак Бинь провинции Бинь Тхуан, Вьетнам) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 6. С. 59–68.
3. Матушко А.К. Определение температуры поверхности воды по данным дистанционного зондирования Земли // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы IV Междунар. науч. конф. Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. 2017. С. 271–274.

4. *Хлебопрос Р.Г., Тасейко О.В., Иванова Ю.Д., Михайлюта С.В.* Красноярск. Экологические очерки. Сибирский федеральный университет. 2012. 130 с.
5. *Giannini M.B., Belfiore O.R., Parente C., Santamaria R.* Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images: comparison of different methods using airborne thermal data // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2015. V. 8, No 3. P. 83–90.
6. *Brivio P.A., Lechi G., Zilioli E.* Principi e metodi di telerilevamento, CittàStudi Edizioni. Torino, 2006. P. 449, 479.
7. *Congedo L.* Semi-Automatic Classification Plugin Documentation // Электронный ресурс: www.fromgistors.blogspot.com. 2017. 278 p.
8. *Hrebtov M., Hanjalić K.* Numerical study of winter diurnal convection over the city of Krasnoyarsk: Effects of non-freezing river, undulating fog and steam devils // *Boundary Layer Meteorology*. 2017. V. 163, issue 3. P. 469–495.
9. *Stone Jr., Rodgers M.O.* Urban Form and Thermal Efficiency: How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island Effect // *APA Journal*. 2001. V. 67, No 2. P. 186–198.
10. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment, Elsevier Science Inc.* 2004. V. 89. P. 467–483.

REFERENCES

1. *Asmus V.V., Dyadychenko V.N., Zagrebaev V.A. et al.* Surface complex for receiving, processing, archiving and distribution of satellite data. SIC "Planeta" works. 2005. V. 1(46). P. 3–21 (in Russian).
2. *Brivio P.A., Lechi G., Zilioli E.* Principi e metodi di telerilevamento, CittàStudi Edizioni. Torino, 2006. P. 449, 479.
3. *Congedo L.* Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. web resource: www.fromgistors.blogspot.com. 2017. 278 p.
4. *Hrebtov M., Hanjalić K.* Numerical study of winter diurnal convection over the city of Krasnoyarsk: Effects of non-freezing river, undulating fog and steam devils. *Boundary Layer Meteorology*. 2017. V. 163, issue 3. P. 469–495.
5. *Khlebopros R.G., Taseiko O.V., Ivanova Yu.D., Mykhaylyut S.V.* Krasnoyarsk. Ecological essays. Siberian Federal University, 2012. 130 p. (in Russian).
6. *Le Hung Trinh, Terekhin E.A., Danh Tuyen Vu.* Application of remote sensing in determining land surface emissivity using LANDSAT multispectral imagery (case study: Bac Binh district, Binh Thuan province, Vietnam). *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2015. V. 12, No 6. P. 59–68 (in Russian).
7. *Matuzko A.K.* Determining water surface temperature by Earth remote sensing data. Regional problems of Earth remote sensing, Materials of IV International Scientific Conference, SFU ISIT. 2017. P. 271–274 (in Russian).
8. *Giannini M.B., Belfiore O.R., Parente C., Santamaria R.* Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images: comparison of different methods using airborne thermal data. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2015. V. 8, No 3. P. 83–90.
9. *Stone Jr., Rodgers M.O.* Urban Form and Thermal Efficiency: How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island Effect. *APA Journal*. 2001. V. 67, No 2. P. 186–198.
10. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment, Elsevier Science Inc.* 2004. V. 89. P. 467–483.

Китов А.Д.¹, Гладков А.С.², Лунина О.В.³, Плюснин В.М.⁴, Иванов Е.Н.⁵,
Серебряков Е.В.⁶, Афонькин А.М.⁷

ГЕОРАДАРНЫЙ И ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕДНИКОВ ХРЕБТА МУНКУ-САРДЫК (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

АННОТАЦИЯ

Более десяти лет ведется мониторинг нивально-гляциальных образований хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян). В результате этих исследований проведена инвентаризация не только ледников, но и каменных глетчеров и наледей этой территории. В результате применения наиболее эффективных и безопасных дистанционных средств для исследования опасных и труднодоступных объектов удалось проследить динамику изменения ледников, а также определить режим формирования наледей. По данным дистанционного зондирования Земли выявлены геометрические (поверхностные) изменения нивально-гляциальных образований. За 115 лет ледник Перетолчина сократился с 0,8 до 0,3 км². Выявлено расчленение ледника и интенсивное бронирование низа языка поверхностными моренами. Другой дистанционный метод, радиолокационное исследование с помощью георадара Око-2, позволил определить, что объем льда этого ледника сократился в 3,7 раза, с 0,026 до 0,007 км³. Более точные георадарные исследования позволили определить, что наибольшая толщина основного ледяного тела составляет 40 м. Учитывая оценку толщины ледника С.П. Перетолчиным в 1908 г. – 85 м, толщина ледяного тела сократилась в два раза. Второй по величине ледник Радде уменьшился с 0,3 до 0,18 км². Кроме того, он разделился на две части. Один основной ледник стекает с вершины Эскадрилья, натекает на ригель и от него поворачивает на север. Второй ледник сильно деградировал. Он ранее представлял дополнительную зону питания. Теперь упирается в этот ригель с образованием небольшого ледникового озера. Бронирование низа ледника также с каждым годом становится интенсивнее.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточная Сибирь, хребет Мунку-Сардык, нивально-гляциальные образования, ледник, каменный глетчер, наледь, радиолокационные исследования, дистанционные исследования.

¹ Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: kitov@irigs.irk.ru

² Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: gladkov@crust.irk.ru

³ Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: lounina@crust.irk.ru

⁴ Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: egoryo@bk.ru

⁵ Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: plyusnin@irigs.irk.ru

⁶ Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: serebryakov.e.v@mail.ru

⁷ Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: andrei.afonkin@mail.ru

Aleksandr D. Kitov¹, Andrey S. Gladkov², Oxana V. Lunina³, Viktor M. Plyusnin⁴, Egor N. Ivanov⁵, Evgeniy V. Serebrykov⁶, Andrey M. Afon'kin⁷

GPR AND REMOTE MONITORING OF GLACIERS OF THE RIDGE MUNKU-SARDYK (THE EAST SAYAN)

ABSTRACT

For more than a decade monitoring of the nival-glacial formations of the Munku-Sardyk ridge (Eastern Sayan) has been conducted. As a result of these studies, not only glaciers, but also stone glaciers and icings, of this territory were inventoried. As a result of application of the most effective and safe remote means for research of dangerous and hard-to-reach objects it was succeeded to trace dynamics of change of glaciers, and also to define a mode of formation of ice. According to remote sensing data of the identified geometric (surface) change of nival-glacial formations. For 115 years, Peretolchina glacier decreased from 0.8 to 0.3 km². It was determined the dismemberment of the glacier and an intensive booking of bottom tongue surface moraines. Another remote method, a radar study using the GPR Oke-2, made it possible to determine that the ice volume of this glacier decreased by 3.7 times, from 0.026 to 0.007 km³. More accurate the GPR survey allowed to determine that the greatest thickness of the main ice body is 40 m. Given an estimate of the thickness of the glacier by S.P. Peretolchin in 1908 – 85 m, the thickness of the ice body has been cut in half. The second largest Radde glacier decreased from 0.3 to 0.18 km². In addition, it was divided into two parts. One main glacier flows down from the Eskadrilia top, that accumulates on the Rigel and it turns North. The second glacier is severely degraded. He early represented an additional area of nutrition. Now rests on this Rigel with the formation of a small glacial lake. Booking the bottom of the glacier also becomes more intense every year.

KEYWORDS: The Eastern Siberia, Munku-Sardyk ridge, nival-glacial formations, glacier, stone glacier, icing, radar-tracking researches, remote sensing researches of the Earth.

ВВЕДЕНИЕ

Отмечаемое в настоящее время потепление климата отражается на состоянии современного оледенения в различных горных районах [IPCC, 2007]. Наблюдаются периоды замедления и ускорения потепления и, соответственно, стационарное состояние и даже наступание некоторых ледников в разных горных системах [Котляков и др., 2017]. По дендрохронографическим исследованиям [Suvorov, Kitov, 2017] и анализу озерных отложений [Stepanova et al., 2015] в районе ледника Перетолчина (вершина Мунку-

¹ V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskay str., 1, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail:* kitov@irigs.irk.ru

² Institute of the Earth's crust SB RAS, Lermontova str., 128, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail:* gladkov@crust.irk.ru

³ Institute of the Earth's crust SB RAS, Lermontova str., 128, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail:* lounina@crust.irk.ru

⁴ V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskay str., 1, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail:* egoryo@bk.ru

⁵ V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskay str., 1, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail:* plyusnin@irigs.irk.ru

⁶ Institute of the Earth's crust SB RAS, Lermontova str., 128, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail:* serebryakov.e.v@mail.ru

⁷ Institute of the Earth's crust SB RAS, Lermontova str., 128, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail:* andrei.afonkin@mail.ru

Сардык, 3491 м, координаты: 100°35'50" ВД, 51°43'05" СШ) выявляются периоды отступления ледника 1900–1965 и 1983–2000 гг., с одновременным повышением прироста деревьев и скорости осадконакопления, и наступания ледника в 1965–1980 гг., сопровождающегося замедлением прироста деревьев и снижением скорости осадконакопления. Ледники Мунку-Сардык имеют один из продолжительных периодов наблюдения [Kitov et al., 2009], сравнительно доступны и как малые ледники Сибири, лежащие ниже теоретической снеговой линии, могут быть индикаторами изменения климата и прогноза динамики крупных ледников, как обладающие низкой инертностью [Осипов и др., 2017]. Поэтому выявление закономерностей изменения ледников и мониторинг их поведения представляет самостоятельный интерес.

Кроме того, использование современных методов и средств дистанционного исследования труднодоступных и опасных объектов, таких как дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса, аэросъемка и съемка с беспилотных летающих аппаратов, дающих возможность изучать поверхностные геометрические характеристики, а также георадарное зондирование (GPR), позволяющее заглянуть в подповерхностные структуры Земли, обеспечивают изучение объемного состояния ледников. Это важно еще при проявлении такого явления, как более интенсивное уменьшение толщины льда при незначительных площадных изменениях размеров ледника, например, как у ледника Азаровой в Кодаре [Коваленко, 2011], да и у того же ледника Радде. Поэтому измерение толщины ледника в дополнение к определению его поверхностных размеров является определяющим при оценке общего объема горного оледенения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения динамики и инвентаризации современного состояния ледников Мунку-Сардык использованы разномасштабные (с разным пространственным разрешением) космоснимки, полученные со спутников Quick Bird, Pleiades, Landsat-4, -5, -7, -8.

Мониторинг толщины ледника Перетолчина проводится с 2014 г. Георадарное профилирование проводилось с помощью георадара Око-2 с антенным блоком АБДЛ «Тритон» (центральная частота 50 и 100 МГц) с разными параметрами диэлектрической проницаемости и временем ожидания отраженной волны. Постепенно увеличивалась площадь исследования и подбирались оптимальные параметры. Впервые в 2014 г. (середина июня) профилирование проводилось в нижней части ледника по 4-м поперечным и 5-ти продольным профилям на частоте 50 МГц. В 2016 г. (конец апреля – май) было выполнено 8 поперечных и 1 продольный профиль по нижнему моренному комплексу, на площади в 3 раза большей, чем в 2014 г. [Китов и др., 2017] на частоте 100 МГц. В 2017 г. (конец апреля – май) профилирование выполнялось с более высокой отметки на леднике (ок. 3040 м), поперечные профили захватывали полную ширину ледника. Было пройдено 7 поперечных и 6 продольных профилей. Профилирование выполнялось, как и в 2016 г. сверху вниз, но был изменен режим зондирования, так как в первом случае не удалось отбить ложе ледника на первых (более высоких на леднике) профилях.

Кроме того, проводилось профилирование ледникового оз. Эхой по двум перекрестным диаметрам, а не радиальным, как в 2016 г. была исследована Большая Мугувекская наледь и уникальный для этой местности каменно-ледовый поток.

Навигационная информация собиралась с помощью портативных GPS-приемник Garmin GPSmap-76Csx и GPSmap-64st. Запись приемником велась в формате WGS-84 десятичных градусов.

Обработка георадиолокационных разрезов проводилась в программе «GeoScan-32» в несколько приемов. Первоначально к радарограммам подбирались подходящие значения

усиления сигналов, яркости и контрастности. Затем использовались стандартные режимы обработки [Китов и др., 2017].

Изменения площади ледника анализировались путем сопоставления разновременных космических снимков Ландсат с разрешением 15–30 м/пиксел 1994–2017 гг. (сцены: Ландсат-4, 1994.07.13; Ландсат-5, 1998.08.25, 2000.08.06; Ландсат-7, 2001.08.09, 2002.08.12, 2007.08.11, 2010.07.17; Ландсат-8, 2015.08.08, 2016.07.25, 2017.07.29). Границы ледника в 2006 г. уточнялись по снимку QuickBird с разрешением 0,6 м/пиксел и в 2013 г. по Pleiades (2013.07.13) с разрешением 2,5 м. Снимки были привязаны к топографической карте масштаба 1:100 000 и приведены в единую проекцию Пулково-1942 WGS-84, зона 17. Дешифрирование и векторизация границ ледника проводилось в ручном режиме RGB-синтезированных снимков каналы 2-4-7 для Ландсат-7 и 3-5-7 для Ландсат-8. Все измерения проводились в программе ArcViewGIS-3.2a. Учитывая разрешение снимков 15 м/пиксель, систематическая погрешность определения площади ледника оценивается в 0,12 км² или 5 % от измеряемой величины.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика размеров ледника Перетолчина по данным космосъемки представлена в табл., рис. 1.

Динамика ледника Перетолчина за 115 лет
Dynamics of the Peretolchina Glacier for 115 years

Вид данных	Год съемки	Площадь, км ²	Периметр, км	Длина, км
Реконструкция	1900	0,82	4,32	1,47
Каталог	1950	0,7		1,1
Топокарта	1960	0,49	2,91	1,01
Ландсат-4	1994	0,47	3,37	1,00
Ландсат-5	1998	0,47	3,07	1,06
Ландсат-5	2000	0,40	3,87	0,94
Ландсат-7	2001	0,41	4,07	0,93
Ландсат-7	2002	0,41	3,49	0,91
Quick Bird	2006	0,31	5,81	0,90
Ландсат-7	2007	0,34	4,10	0,86
Ландсат-7	2010	0,33	4,00	0,90
Ландсат-8	2015	0,33	3,74	0,86
Ландсат-8	2016	0,30	4,09	0,81
Ландсат-8	2017	0,29	4,31	0,81

Графа «Вид данных» представляет использованный источник данных для определения характеристик ледника. Реконструкция границ ледника получена наложением схемы С.П. Перетолчина [Перетолчин, 1908] на данные ДЗЗ Quick Bird и уточнения границ по современным моренным комплексам. Данные по каталогу ледников [Каталог..., 1973] формировались по аэросъемке в 1950-х гг. В 1960-е гг. характеристики определены по топографической карте соответствующего года издания. В последующие годы площадь и длина ледника определялись в основном по данным ДЗЗ Ландсат.

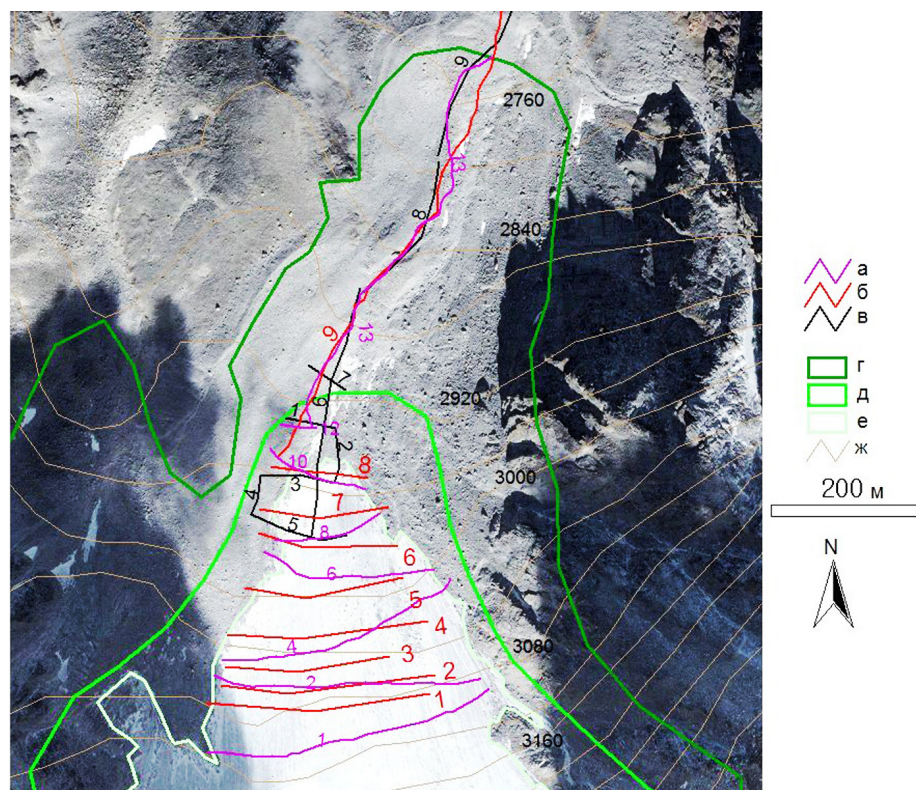


Рис. 1. Динамика ледника Перетолчина и профили георадарного исследования: а – профили 2017 г. (на видимой части ледника показаны только поперечные профили); б – 2016 г., в – 2014 г. (подписи соответствующего цвета линиям, 1–13 – номера профилей); г, д, е – стадии открытой нижней части ледника соответственно в 1900, 1960 и 2006 гг.; ж – линии рельефа с обозначением высоты через 80 м

Fig. 1. Dynamics of the Peretolchina Glacier and georadar research profiles: а – 2017 (the visible portion of the glacier is showing only transverse sections); б – 2016, в – 2014 (the signature of the corresponding color lines, 1–13 – number profiles); г, д, е – stage, open the bottom of the glacier, respectively, in 1900, 1960 and 2006; ж – line relief with the designation of height through 80 m

При георадарном профилировании в 2017 г. удалось получить профиль ложа основной ледовой массы в месте, где толщина должна быть близкой к максимальной. На тех участках, выше и ниже зоны поперечного профилирования, толщина ледника определялась по моделям, с оптимальными параметрами для данного типа ледника [Китов и др., 2017]. Некоторые профили пространственно совпали, например, профили всех лет № 3, 8, 10 в 2014, 2016 и 2017 гг., или в наиболее высоком месте профили № 2 в 2016 и 2017 гг. (см. рис. 1). Для профилей № 2 радарограммы частично перекрываются (рис. 2).

Верхние части профилей соответствуют трекам на поверхности ледника. В 2016 г. при установленных параметрах ожидания отраженной волны не удалось определить максимальную глубину (глубина зондирования 23 м), поэтому ложе реконструировалось по эллиптической модели (макс. глубина 37 м). Однако видно (см. рис. 2), что реальный профиль значительно отличается. Также видно, что ледник шире, а там, где кончается профиль 2016 г. есть выступ коренных пород, способствующий образованию моренного гребня, выходящего к фирну (1), а истинный край ледника, лежащий на коренных породах, в конце профиля 2017 г. Максимальная глубина льда (2) – 38 м (по профилю 2017 г.) получилась смещенной к западу от осевой линии. Общая площадь сечения 2017 г. больше из-за большей ширины, чем в 2016 г. В тоже время, благодаря выявленным донным структурам (3), максимальная глубина сечения достигает 47 м.

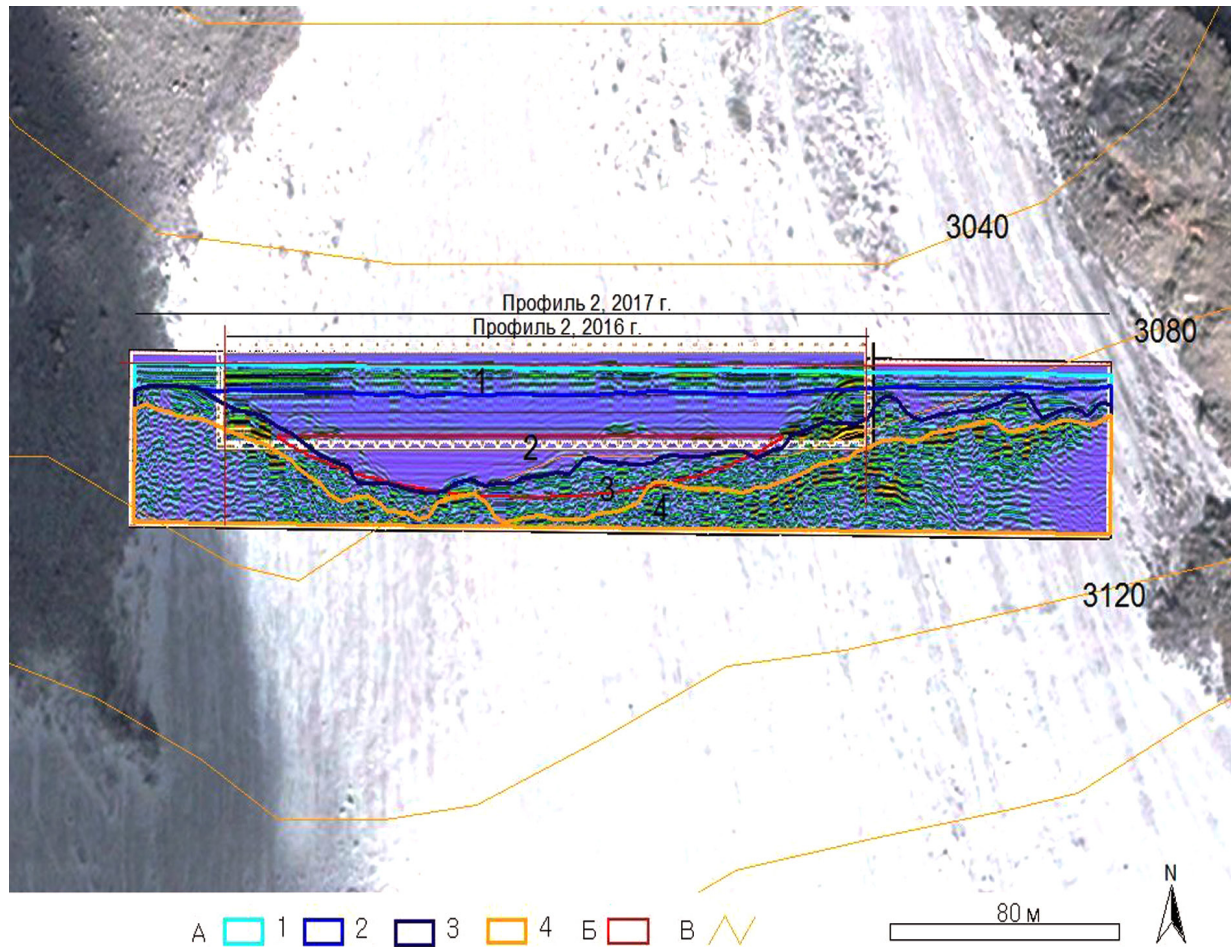


Рис. 2. Радарограммы исследований 2016 и 2017 гг.:

А – структуры сечения ледника по профилю 2017 г.: 1 – фирн; 2 – лед (темно-синим выделено ложе ледника основного ледяного тела; 3 – донные моренные отложения; 4 – мерзлые породы, возможно, частично разрушенные и со льдом; Б – реконструированное ложе ледника по эллиптической модели для профиля 2016 г.; В – линии рельефа с отметками высот. Фон – космоснимок Quick Bird 2006 г.

Fig. 2. Radarogrammy research 2016 and 2017 years:

А – structure section of the glacier in 2017: 1 – firn; 2 – ice (dark blue highlighted the main glacier ice bed body; 3 – bottom moraine sediments; 4 – frozen rocks may partially destroyed and with ice; Б – re-constructed lodge glacier on the elliptical model for 2016 profile; В – in-line relief with marks heights. Background – satellite image Quick Bird, 2006

Обследование ледника Радде по дистанционным данным и наземным заверкам показало, что ледник сократился значительно по толщине, чем по площади, и активно бронируется поверхностными моренами (рис. 3).

По С.П. Перетолчину и Каталогу ледников СССР площадь ледника Радде была 0,3 км², а максимальная длина 0,6 км (эти же цифры соответствуют открытой части ледника). По данным топокарты 1960 г. площадь и длина соответственно 0,3 км² и 0,9 км. По данным ДЗЗ в 2006 г. его площадь и длина открытой части сократилась до 0,2 км² и 0,8 км, в 2010 г. до 0,18 км² и 0,8 км, хотя общая площадь ледника с поверхностными моренами осталась прежней. В настоящее время (2017 г.) площадь основной открытой части – 0,06 км², а с нижней бронированной – 0,11 км², длина соответственно – 0,5 км и общая – 0,8 км. Площадь отделившейся деградированной части – 0,048 км², а длина – 0,34 км. Общая площадь льда в цирке – 0,16 км².

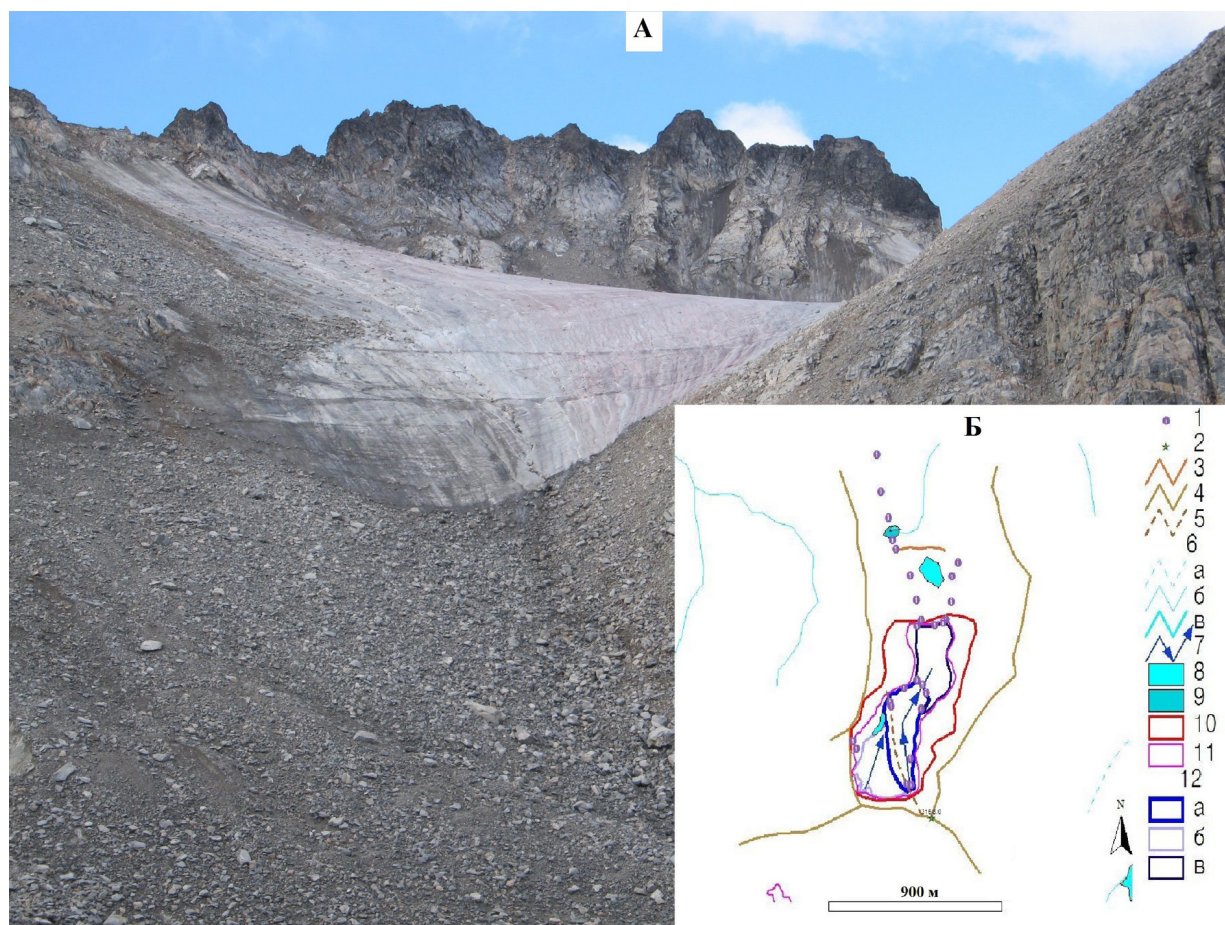


Рис. 3. Ледник Радде: А – общий вид основного ледника и нижней бронированной части, на дальнем плане на склоне деградировавшая часть ледника;

Б – схема ледника по данным ДЗЗ:

1 – пикеты по трассе обследования; 2 – вершина Эскадрилья, 3168 м; 3 – ригель края современного моренного комплекса; 4 – линии хребтов; 5 – ригель под верхней частью основного ледника; 6 – гидро-сеть (а, б, в – ручьи и реки разной величины); 7 – направление течения льда; 8 – образовавшееся в 2017 г. оз. Провальное в современном моренном комплексе и оз. Радде на леднике; 9 – ледниковое оз. Верхнее (исток р. Белый Иркут); 10 – границы ледника в 1960-е гг.; 11 – современные границы по данным ДЗЗ 2006 г.; 12 – современные структуры ледника: а – основная открытая часть; б – деградировавшая часть с озером у ригеля основной части; в – бронированная нижняя часть основного ледника

Fig. 3. Radde glacier: А – general view of the main glacier and lower armored parts for background on the slope of the degraded part of the glacier; Б – diagram of the glacier on Earth remote sensing data:

1 – pickets along the track; 2 – top Eskadriya, 3168 m; 3 – Rigel edges of modern morainic complex; 4 – line ranges; 5 – Rigel under the top part of the main glacier; 6 – river system (a, б, в – streams and rivers of various sizes); 7 – ice flow direction; 8 – the new Lake Failure of the morainic complex, formed in 2017, and the Lake Radde on the glacier; 9 – glacial Lake Verkhnee (source r. Beliy Irkut); 10 – border glacier in 1960-ies; 11 – modern boundaries according to satellite image, 2006; 12 – the modern structure of the glacier: a – the main open part; б – the degraded part with the Lake from the main part of the Rigel; в – the lower armored part of the main glacier

Исследования ледника Радде выявили его особенности. Фактически там два ледника – один упирается в другой, образуя наверху в цирке углубление и подпружное озеро (оз. Радде). Основной ледник, спускаясь с вершины Эскадрилья в северо-западном направлении, а затем в средней части почти на 90 градусов поворачивает к северу и круто спускается. В отличие от наблюдений с соседних хребтов (казалось, что он пологий на верхнем участке),

он оказался довольно крутой, и перемещение по нему без кошек было бы невозможно. Вероятно, ледник лежит на ригеле, по которому стекает с вершины, а затем поворачивает и течет вниз. В юго-западном направлении он образует крутой сброс. Другой ледник стекает с северного, северо-западного склона цирка и упирается нижней частью с разреженными поверхностными моренами в основной ледник (покрытый льдом ригель), образуя в самой нижней части оз. Радде, покрытое тонким льдом с плавающими кусками фирна, сорвавшимися с основного ледника (фактически – озеро на леднике). При наблюдении с основного ледника казалось, что упирающийся в него ледник объемный в верхней части, но при подъеме на хребет выяснилось, что это почти стаявший присклоновый (пристенный) ледник.

По сравнению с прошлым годом основной ледник существенно деградировал, просел в нижней части языка и еще больше забронировался поверхностными моренами. Кроме того, в моренном поле конечных морен, упирающемся в разрушенный скальный ригель, образовалось значительных размеров оз. Провальное. Так что ледник Радде теперь имеет три озера – наверху на самом леднике (оз. Радде), внизу на современных конечных моренах (оз. Провальное) и ледниковое небольшое озеро (оз. Верхнее) за конечными моренами у пер. 26-го Партсъезда (см. рис. 3, Б).

Следует отметить, что в 2017 г. зафиксировано наибольшее стаивание ледников массива. Фактически не сохранились многолетние снежники, большая их часть перешла в стадию сезонных.

ВЫВОДЫ

Использование дистанционных средств наземного, воздушного и космического базирования позволяет оперативно отслеживать изменения нивально-гляциальных образований в пространстве на поверхности Земли и в ее толще. Для этого применяются приборы на принципах электромагнитного излучения в большом диапазоне длин волн. Наиболее востребованы для мониторинга ледников данные ДЗЗ Ландсат, а для исследования толщи ледников (толщины льда, внутренней структуры) георадар Око-2 с антенным блоком АБДЛ «Тритон». Площадь и толщина основных ледников горного массива Мунку-Сардык постоянно уменьшается. За 115 лет наблюдения площадь ледника Перетолчина уменьшилась с 0,82 до 0,29 км², а его толщина на 50 м, и соответственно объем в 3,7 раза. Площадь открытой части ледника Радде уменьшилась за 65 лет с 0,3 до 0,06 км², хотя общая площадь с учетом всех его составляющих уменьшилась до 0,2 км². Для дальнейшего подповерхностного исследования необходимо варьирование параметрами георадара. Также планируется георадарное профилирование ледника Радде.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по программе ФНИ «Геоинформационное картографирование и математическое моделирование географической среды в условиях глобализации и воздействия на природные и социально-экономические процессы в Сибири и на сопредельных территориях»; при поддержке гранта РФФИ 16-05-00902А «Механизмы самоорганизации геосистем Прибайкалья».

ACKNOWLEDGEMENTS

Study on program FSI "Geoinformation mapping and mathematical modelling of geographic Wednesday in the context of globalization and the impact on the natural and socio-economic processes in Siberia and adjacent territories"; supported by grant 16-05-00902 "Mechanisms of self-organization of Geosystems of Baikal".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог ледников СССР. Т. 16, Вып. 1. Ч. 3–5; Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 64 с.
2. Китов А.Д., Гладков А.С., Лунина О.В., Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Серебряков Е.В., Афонькин А.М. Изменения мощности ледника Перетолчина (Восточный Саян) // Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2017. 1 (23). С. 405–417. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-405-417.
3. Коваленко Н.В. Режим и эволюция малых форм оледенения. М.: МАКС Пресс, 2011. 240 с.
4. Котляков В.М., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М. Изменение горных ледников в Северном и Южном полушариях за последние 160 лет // Лёд и Снег. 2017. Т. 57, № 4. С. 453–467. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467.
5. Осипов Э.Ю., Осипова О.П., Клевцов Е.В. Инвентаризация ледников Восточного Саяна по материалам космических съемок // Лёд и Снег. 2017. Т. 57, № 4. С. 483–497. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497.
6. Перетолчин С.П. Ледники хребта Мунку-Сардык // Изв. Томского техн. ин-та. Т. 9. Томск: Типолитография Сиб. т-ва печатного дела, 1908. 60 с.
7. IPCC. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. By S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Cambridge; N.Y., Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. 996 p.
8. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plusnin V.M. The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. Geography and natural resources. 2009. V. 30, No 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.
9. Stepanova O.G., Trunova V.A., Sidorina A.V., Zvereva V.V., Melgunov M.S., Petrovskii S.K., Krapivina S.M., Fedotov A.P., Rakshun Ya.V. Investigating Bottom Sediments from Proglacial Lake Ehoy (Eastern Sayan Ridge) by Means of SR-XRF // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2015. V. 79, No 1. Allerton Press, Inc. 2015. P. 118–121.
10. Suvorov A.G., Kitov A.D. Variability in Natural Conditions of the Periglacial Zone of the Munku-Sardyk Massif (Eastern Sayan) // Geography and Natural Resources. 2017. V. 38, No 1. P. 101–110. DOI: 10.1134/S1875372817010139.

REFERENCES

1. IPCC. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ed. By S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Cambridge; N.Y., Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. 996 p.
2. Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 16. Is. 1. Pt. 3–5. Is. 2. Pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973. 64 p. (in Russian).
3. Kitov A.D., Gladkov A.S., Lunina O.V., Plusnin V.M., Ivanov E.N., Serebryakov E.V., Afon'kin A.M. Changes in thickness of Peretolchin glacier (Eastern Sayan). Proceedings of the International conference "InterCarto/InterGIS". 2017. 1 (23). P. 405–417 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-405-417.
4. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plusnin V.M. The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. Geography and natural resources. 2009. V. 30, No 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.
5. Kotlyakov V.M., Chernova L.P., Murav'yov A.Ya., Khromova T.E., Zverkova N.M. Changes of mountain glaciers in the Northern and Southern Hemispheres over the past 160 years. Ice and Snow. 2017. V. 57, No 4 P. 453–467 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467.

6. *Kovalenko N.V.* Mode and the evolution of small forms of glaciation. Moscow: MAKS Press, 2011. 240 p. (in Russian).
7. *Osipov E.Y., Osipova O.P., Klevtsov E.V.* Inventory of glaciers in the Eastern Sayan on the basis of space surveys. *Ice and Snow*. 2017. V. 57, No 4. P. 483–497 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497.
8. *Peretolchin S.P.* Ledniki hrebta Munku-Sardyk [Glaciers of the Munku-Sardyk Range], *Izv. Tomsk. tekhn. in-ta*, T. 9. Tomsk: Tipolitografiya Sib. t-va pechatnogo dela, 1908. 60 p. (in Russian).
9. *Stepanova O.G., Trunova V.A., Sidorina A.V., Zvereva V.V., Melgunov M.S., Petrovskii S.K., Krapivina S.M., Fedotov A.P., Rakshun Ya.V.* Investigating Bottom Sediments from Proglacial Lake Ehoy (Eastern Sayan Ridge) by Means of SR-XRF. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2015. V. 79, No 1. Allerton Press, Inc., 2015. P. 118–121. DOI: 10.3103/S1062873815010311.
10. *Suvorov A.G., Kitov A.D.* Variability in Natural Conditions of the Periglacial Zone of the Munku-Sardyk Massif (Eastern Sayan). *Geography and Natural Resources*. 2017. V. 38, No 1. P. 101–110. DOI: 10.1134/S1875372817010139.

Рыльский И.А.¹

ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ И ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены подходы к комплексному решению проблемы определения таксационных показателей и описаний с использованием дистанционных методов и ограниченных по объему наземных работ. В качестве источников данных дистанционного зондирования предлагается использовать материалы космических многозональных съемок сверхвысокого разрешения, данные воздушного лазерного сканирования с пилотируемых носителей, цветную цифровую аэрофотосъемку в тесной комбинации друг с другом, что позволяет взаимно нивелировать недостатки каждого из методов.

С помощью космических снимков выполняется комплекс работ по дешифрированию породного состава, бонитета леса. Обработка космических снимков (ортотрансформирование) ведется с использованием в том числе и аэросъемочных данных (лазерное сканирование дает ЦМР, по которой ведется ортокоррекция, данные аэрофотоснимков с аппаратной привязкой используются для геопривязки космических данных).

Наземные работы представлены натурными измерениями отдельных деревьев на крайне ограниченных по объему площадях. Результаты натурных измерений используются в качестве эталона для оценки точности и определения численных зависимостей между геометрическими параметрами, которые могут быть получены по данным дистанционного зондирования (высота и диаметр кроны), и параметрами, которые не могут быть получены прямыми дистанционными методами (диаметр ствола, фитомасса, прочее). В работе рассмотрены основные технологические способы получения и обработки данных, общие подходы и отдельные частные рекомендации по порядку выполнения работ. На примере значительного объема выполненных работ обосновывается возможность решения основных проблем, стоящих при определении таксационных показателей с большей точностью и меньшей стоимостью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование Земли, инвентаризация и мониторинг лесов, дистанционный мониторинг лесов, лазерная локация, цифровая аэро- и космическая фотосъемка, лидар, обработка изображений, геоинформационные системы, Красноярский край.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: rilskiy@mail.ru

Ilya A. Rylskiy¹

APPROACHES TO THE DETERMINATION OF TAXATION INDICATORS OF FORESTS USING AEROSPACE IMAGES AND LIDAR DATA

ABSTRACT

The article is dedicated to overview the approaches for solving basic problems of defining taxation parameters and forest inventorying using remote sensing methods without massive terrestrial surveying. Authors suggest using remote sensing data (high resolution space images), digital multispectral airborne data, LIDAR data (using manned vehicles) in a combination that allows to avoid weak point of each method.

Satellite images were used for depiction of forest type and taxation classes of trees. Satellite image processing (orthorectification) has been implemented using airborne data: the LIDAR data has been used to produce DEM for orthocorrection, aerial images with measured center coordinates and orientation angles were used for collection of ground control points for georeferencing.

Terrestrial researches described in the article include physical measurements of trees (as etalons values) and their parameters made on very small areas. These measurements are used as control values when proving results of remote sensing data processing, or for defining equations between parameters that can be measured using remote sensing data (tree height, diameter of canopy) and parameters that can not (log diameter, biomass, etc.). Basic and specific data processing technologies are briefly described, some practical recommendations are included. Based upon vast area of surveying and data processing, authors prove the ability to solve basic taxation problems and tasks using less efforts with better precision and higher speed.

KEYWORDS: Remote sensing, forest inventory, forest monitoring, LIDAR, airborne laser scanning, digital aerial imagery, space images, image processing, GIS, geoinformatics.

ВВЕДЕНИЕ

Появление новейших методов сбора геоданных (спутниковые снимки сверхвысокого разрешения, лазерное сканирование с воздуха, гиперспектральные съемки и т. п.) требует постоянного проведения исследований того, как указанные методы могут изменить и улучшить информационное обеспечение задач, решавшихся ранее альтернативными методами. Комплексирование этих методов позволяет нивелировать недостатки одних технологий за счет преимуществ других.

На фоне постепенного роста внимания к проблемам леса и попыток более эффективного использования ресурсов в целом логично было бы ожидать повышения требований по информационному обеспечению – «интеллектуализации» отрасли. Тем не менее, несмотря на то, что вышеописанные методы по отдельности применяются в самых различных областях хозяйства (в том числе и в РФ), их совместное использование не нашло применения в практике информационного обеспечения лесоустроительных работ.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: rilskiy@mail.ru

Действительно, подобное развитие имеет место в странах, не богатых природными ресурсами и с высоким уровнем жизни (Западная и Северная Европа), один из лидеров в этом отношении – Финляндия. В России традиционный подход к таксации описывается формулой «минимальная цена и минимальное правдоподобие», при этом ни качество собственно таксации лесов, ни возможности по перспективному развитию отрасли в расчет не принимаются. В качестве одного из аргументов сторонников существующего положения дел используется тезис о том, что все характеристики не могут быть получены дистанционными методами, а раз все равно нужны полевые работы, то никакие высокие технологии особо не нужны.

Тем не менее, эти подходы не могут без конца поддерживаться на фоне курса на цифровую экономику, и рано или поздно будут заменены более интеллектуальными методиками. Поэтому целью данной работы явилась разработка подходов и технологии автоматизированного определения таксационных показателей лесных участков с использованием материалов дистанционного зондирования Земли (аэрофотосъемка в видимом диапазоне, космическая многозональная съемка) и воздушного лазерного сканирования.

В ходе исследования ставились следующие задачи:

- получение данных таксационных описаний лесных выделов и составление тематических лесных карт (планов лесонасаждений, окрашенных по породам);
- разработка рекомендаций и методологии работ по автоматизированному определению таксационных показателей лесных участков на основе данных лазерной локации и цифровой аэросъемки, позволяющих обрабатывать эти данные и получать таксационные характеристики всех категорий земель лесного фонда;
- максимальное снижение доли полевых работ.

Работы выполнялись на площади 110 км² на двух участках (полигонах), расположенных в Устьюгском и Мостовском участковых лесничествах Красноярского края. Данная территория расположена в умеренном поясе, климат территории – резко континентальный. Регион отличается значительными запасами леса и интенсивно использует данную ресурсную базу. Леса отличаются достаточно высокой продуктивностью, что создает хорошие предпосылки для экономической обоснованности использования данной методики.

При выполнении работ использована условная система координат на базе WGS84, проекция UTM.

Общая схема работ выглядела следующим образом:

Этап 1. Выполнение аэросъемочных работ с одновременным фотографированием территории (цифровые фотоснимки, RGB, разрешение 20 см) и выполнением воздушного лазерного сканирования с плотностью лучше 4 точек на 1 м².

Этап 2. Получение и первичная обработка данных космической сканерной съемки (видимый + ближний инфракрасный диапазон) с детальностью 50 см на ту же территорию, время съемки при этом отличалось на 1–1,5 месяца от времени авиационного залета.

Этап 3. Определение породного состава древостоев и типов леса по данным многоспектральной аэро- и космической фотосъемки

Этап 4. Проведение полевых исследований с закладкой выделов – эталонов для калибровки и контроля полученных данных таксации лесов, осуществленной методом дешифрирования данных аэросъемки и лазерной локации.

Этап 5. Разработка технологии автоматизированного дешифрирования, определения величины таксационных показателей лесных участков по данным цифровой аэросъемки и лазерной локации. Данные этапов 3 и 4 использовались при расчетах.

Этап 6. Проверка результатов дешифрирования на тестовых участках, не использованных в расчетах ранее.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общие положения. В современной практике инвентаризации и мониторинга лесов получение достоверной и оперативной информации о состоянии и динамике лесных ресурсов является актуальной задачей. В решении этой задачи в последние годы во многих странах мира и в России все активнее используются лазерная локация и цифровая аэро- и космическая фотосъемка, которые представляют собой важнейшие источники данных для наполнения геоинформационных систем и пространственного анализа для решения природопользовательских задач [Тикунов и др., 2013]. Эти инновационные и эффективные методы находят сегодня широкое применение во многих отраслях, являясь, в том числе, информационной основой инвентаризации и устройства лесов, лесоэкологического мониторинга, составления кадастров природных ресурсов, систем сбора, обработки, анализа данных и баз знаний [Тикунов и др., 2013].

Таблица 1. Сравнение пригодности оценки характеристик
лесного покрова различными методами

Table 1. Suitability of different methods for estimation of forest characteristics

Методы регистрации и измерений	Размеры отдельных деревьев	Высота деревьев	Площади и границы объектов	Скорость получения данных	Скорость обработки данных	Классификация лесного покрова
Наземные измерения	5	3	2	2	3	2
Обычная аэрофотосъемка (RGB, RGB+NIR)	4	3	4	4	2	5
Спутниковая многозональная съемка	2	2	5	5	5	4
Лазерное сканирование	4	5	4	5	5	3

Примечание. Оценка в баллах: 5 – отлично, 2 – плохо или невозможно

Современные авиационные лазерно-локационные системы стремительно развиваются и на сегодняшний день имеют частоту сканирования 2 000 000 импульсов (измерений) в секунду. Наибольшая плотность точек сканирования при этом составляет от 4 до 50 точек на 1 м² поверхности, а точность измерения геометрических параметров наземных объектов и морфоструктурных элементов растительности в плановой и профильной проекциях составляют порядка $\pm 5\text{--}10$ см. Точность спутникового позиционирования контуров линий и границ лесных выделов, пробных площадей, отдельных деревьев и морфоструктурных элементов их стволов и крон, в том числе и в подкроновом пространстве, практически не ограничена и определяется техническими характеристиками приборов геопозиционирования [Медведев и др., 2007].

Средствами пространственного и детального отображения контуров и рельефа земной поверхности с представленной на них растительностью и основой для предварительного трассирования маршрутов авиационной лазерной и цифровой аэрофотосъемки могут также являться спутниковые снимки, дешифрованные по основным параметрам и характеристикам растительного покрова в границах лесотаксационных выделов.

Структура, объемные показатели деревьев и древостоев определяются по лазерно-локационным данным, интегрированным с цифровыми геотрансформированными аэрофотоснимками на основе цифровой модели местности (ЦММ) и поля распределения лесного полога, которые генерируются из исходных данных лазерной локации [Медведев и др., 2007]. При обработке и анализе лазерно-локационных данных и цифровых аэрофотоснимков используются методы математической морфологии, оперирующей понятиями теории множеств и нечетких множеств [Soille, 2003; Данилин, Фаворская, 2011].

Лазерно-локационная модель земной поверхности и лесной растительности позволяет получать детальные координаты и морфоструктурные характеристики рельефа местности и лесных насаждений средствами трехмерной компьютерной графики и визуализации с использованием программных продуктов TerraSolid, ArcGis версии 9.0 и выше и др. (рис. 1).

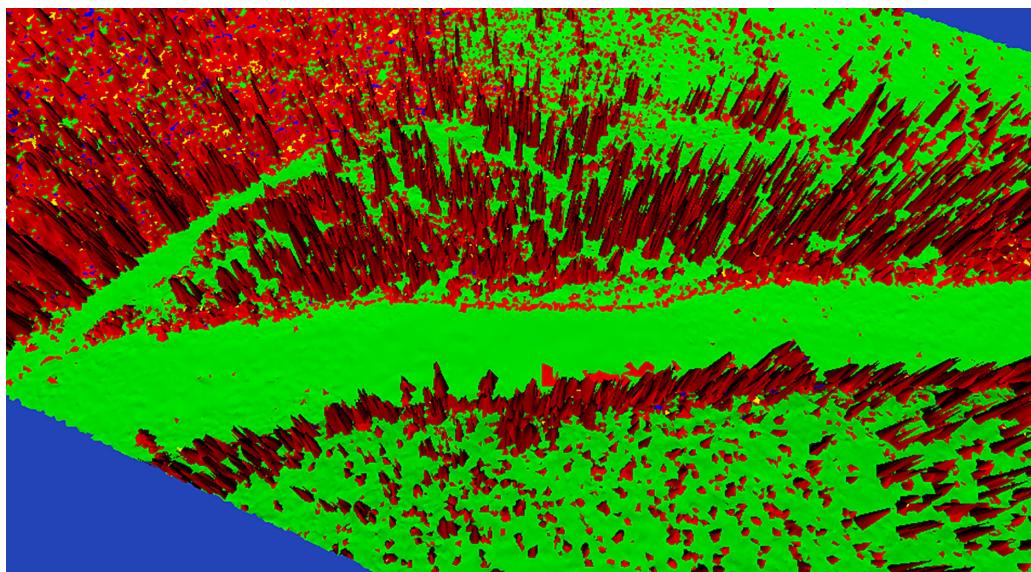


Рис. 1. Цифровая модель леса, построенная по данным лазерной локации
Fig. 1. Digital forest model, built using LIDAR data

В ряде работ, выполненных ранее в России и за рубежом, было показано, что точность оценки древесного запаса и биомассы леса, в том числе методами авиационного зондирования, возможно повысить до 7–10 % с использованием морфологической классификации и аллометрических взаимосвязей между размерами деревьев [Holmgren, Persson, 2004; Chen, 2007].

Выполненные исследования показывают, что структура растительного покрова наиболее эффективно определяется по характеристикам рядов распределения деревьев по диаметру и высоте, вертикальной и горизонтальной протяженности крон, которые, в свою очередь, взаимосвязаны и коррелированы. При этом объемные и весовые показатели деревьев и древостоев с высокой точностью аппроксимируются аллометрическими функциями через их морфоструктурные признаки (рис. 2; табл. 2).

Построение рядов распределения деревьев по морфометрическим показателям традиционно предполагает выполнение трудоемких наземных биометрических процедур, операций и перечетов (сплошных или выборочных), которые требуют значительных финансовых затрат. Вместе с тем, метод лазерной локации, совместно с цифровой аэросъемкой субдециметрового разрешения, позволяет выполнять «попиксельную» инструментально-измерительную таксацию на основе прецизионной спутниковой геодезии и детальной топографической съемки, изучать динамику лесного покрова, горизонтальную и вертикальную структуру насаждений, реконструировать ряды распределений деревьев по любому

морфоструктурному признаку, вычислять искомые таксационные показатели и фитомассу леса в автоматическом режиме с высокой точностью и на достаточно больших площадях (до 300 км² за один рабочий летный день).

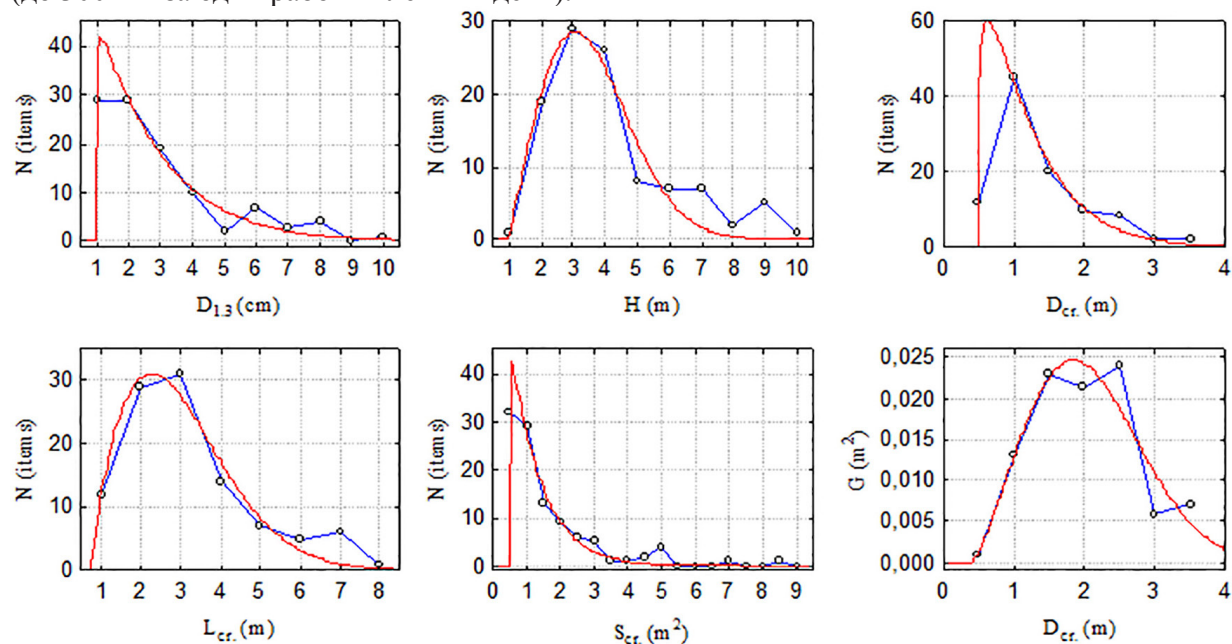


Рис. 2. Распределение деревьев лиственницы (N) по морфометрическим показателям стволов и крон, аппроксимированное функцией Вейбулла:

$D_{1.3}$ – диаметр ствола на высоте 1,3 м от его основания, см; H – высота дерева, м; $D_{кр.}$ – диаметр кроны, м; $L_{кр.}$ – длина кроны, м; $S_{кр.}$ – площадь кроны, м²; G – сумма площадей поперечных сечений стволов на высоте 1,3 м, м²

Fig. 2. Tree distribution (larix) (N) by morphometric parameters of logs and canopies, approximated by Weibull function:

$D_{1.3}$ – log diameter on 1.3 height, cm; H – tree height in meters; $D_{кр.}$ – canopy diameter, m; $L_{кр.}$ – canopy length, m; $S_{кр.}$ – canopy area, m²; G – sum of areas of log cross-sections on 1.3 m height, m²

Таблица 2. Примеры значений коэффициентов регрессии морфометрических и весовых (фитомасса) показателей

Table 2. Some examples of regression coefficients used for estimation of morphometric parameters and biomass

Модель аппроксимации:	$P = aD_{1.3}^2 H$			$P = aD_k^2 H$		
Параметры уравнения:	a	S	R ²	a	S	R ²
Зависимая переменная:						
Надземная часть	0,029	0,505	0,996	0,266	2,122	0,964
Ствол	0,0203	0,055	0,999	0,187	1,750	0,951
Древесина	0,017	0,037	0,999	0,153	1,452	0,950
Кора	0,004	0,008	0,996	0,034	0,307	0,951
Крона	0,008	0,258	0,976	0,079	0,427	0,983
Ветви $\varnothing > 1$ см	0,003	0,068	0,940	0,024	0,217	0,959
Ветви $\varnothing < 1$ см	0,002	0,021	0,969	0,020	0,272	0,892
Побеги текущего года	0,0001	0,000	0,873	0,0001	0,005	0,966
Хвоя	0,003	0,089	0,917	0,024	0,074	0,995
Отмершие ветви	0,001	0,002	0,987	0,009	0,110	0,918

Примечание. P – вес фракции дерева в абсолютно сухом состоянии, кг; $D_{1.3}$ – диаметр ствола на высоте 1,3 м от его основания, см; H – высота дерева, м; D_k – диаметр кроны, м; a – константа уравнения; S – стандартная ошибка уравнения; R^2 – индекс детерминации.

Оценка древесных запасов по данным лазерной локации и цифровой аэросъемки в каждом конкретном случае сводится к установлению базовых закономерностей изучаемого объекта и определению соотношений между объемами стволов, высотой и диаметрами стволов и крон деревьев, которые составляют 87–98 % объясненной изменчивости различных морфоструктурных элементов.

Этапы 1 и 2: выполнение аэросъемочных работ и обработка данных космической многозональной съемки

Выполнение авиационных съемочных работ

Воздушное лазерное сканирование и аэрофотосъемка выполнялись воздушным лазерным сканером RIEGL Q560 совместно с цифровым аэросъемочным комплексом IGI DigiCAM, включающим цифровую камеру Hasselblad H39 (рис. 3). Съемочное оборудование располагалось на борту самолета АН-2. В процессе производства лазерной локации и аэрофотосъемки определялись элементы взаимного ориентирования GPS антенны, лазерного сканера, аэрофотокамеры.

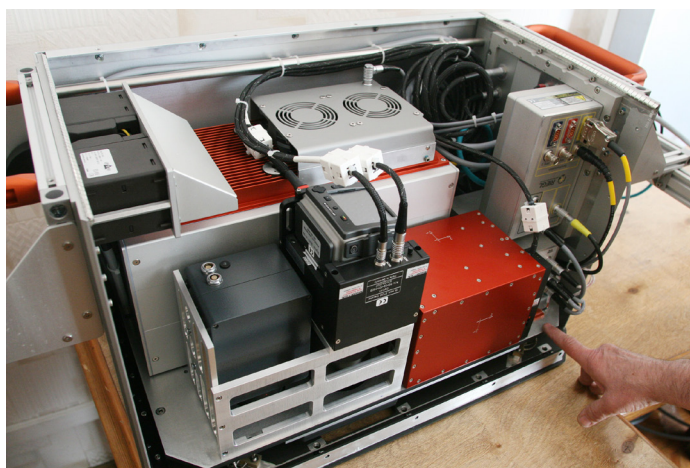


Рис. 3. Лазерный аэросъемочный комплекс Riegl Q560

Fig. 3. Airborne laser scanning system Riegl Q560

В процессе производства летных съемочных работ на борту самолета использовался входящий в комплект аэросъемочной аппаратуры фазовый GPS-приемник Novatel совместно с инерциальной навигационной системой IGI.

Выполнение работ соответствовало требованиям для достижения необходимой точности: работа в благоприятной GPS обстановке ($PDOP < 4$), количество одновременно наблюдаемых спутников GPS не менее 6, соблюдение необходимых угловых параметров (крен, тангаж не более 3°), расстояние от воздушного судна до базовых приемников не более 30 км, высота спутников над горизонтом более 10° , высота воздушного судна во время аэрофотосъемки – 600 м, что обеспечивает точность измерений по высоте лучше 12 см, в плане – лучше 30 см. Минимальная ширина полосы захвата на заданной высоте полета – 600 м. Средняя плотность точек составляет 4–8 т/м². Геометрическое разрешение аэрофотоснимков составило 8 см. Данные базовых приемников и бортового приемника регистрировались с периодичностью 1 Гц (одно измерение в секунду). При этом GPS-приемники регистрировали сигналы двух спутниковых систем: GPS и ГЛОНАСС.

Первичная обработка съемочных данных

Расчет траектории полета осуществлен с использованием программных комплексов GRAFNAV и AeroOffice. Кинематические GPS-измерения взаимно уравнивались с данными наземных базовых станций и инерциальной навигационной системы (ИНС). Каждая

траектория просчитывалась в прямом и обратном направлениях. Сопоставление полученных прямого и обратного решений показывает величину расхождений около 5–7 см. Итоговая точность траекторий находится в пределах 10 см (по данным графика Estimated Position Accuracy в ПО GrafNav).

Поскольку система воздушного лазерного сканирования оснащена ГНСС-ИНС системами, то мы имеем возможность не аналитического, а непосредственно аппаратного измерения элементов внешнего ориентирования каждого фотоснимка – угловые значения дают данные ИНС, координаты центров фиксируются по данным ГНСС и синхронизированного с ними по времени срабатывания затвора камеры. Тем самым достигается возможность работы без наземных опорных точек. Это повышает скорость выполнения работ – все съемки и планово-высотное обоснование на площади в 11 000 га были выполнены за 1 день. Это сильно снижает стоимость итоговых работ.

Близкая по принципу работы схема геопривязки данных лазерного сканирования используется и в мобильных сканирующих системах, предназначенных для оперативного картографирования в движении [Малеванная, Рыльский, 2014]. Однако в этом случае носитель движется по земле, а не по воздуху. Несмотря на более низкие издержки (нет необходимости нанимать самолет, достаточно обычного транспорта) производительность в лесу оставляет желать лучшего. В данной работе мобильные лазерные системы не применялись.

После получения точной траектории и элементов внешнего ориентирования производился вывод точек лазерных отражений (ТЛО) в систему координат проекта.

После вывода точек лазерных отражений была произведена их классификация.

Классификация ТЛО включала в себя два этапа:

- автоматическая классификация;
- проверка полученных результатов и ручная реклассификация (при необходимости).

Для проведения автоматической классификации после получения данных проведен их анализ, на основании которого подобраны параметры для итерационной процедуры классификации «земли»: размер первичной ячейки, углы и пределы включения точек в класс «земли», ограничение длины ребер триангуляции. Классификация ТЛО проведена в программном обеспечении TerraScan по следующей схеме:

- определение ложных отражений;
- разделение ТЛО на первые и последние отражения;
- автоматическое выделение класса «земля» по вышеуказанным параметрам;
- автоматический отбор ошибочных точек из класса «земля»;
- анализ полученных результатов путем просмотра и профилирования классифицированного облака ТЛО, ручная доработка (реклассификация) точек, в местах пропусков автоматической классификации;
- получение класса точек «Растительность»;
- вычленение из класса растительность точек, расположенных менее чем в 1 м над землей.

Создание цифровой модели поверхностей рельефа и растительности

После проведения автоматизированной классификации точек лазерных отражений и интерактивной коррекции результатов классификации, создание цифровой модели поверхностей (рельеф и растительность) велось по следующей схеме:

- массив точек (нерегулярный) из нужного класса точек (допустим, «земля») используется при выполнении триангуляции Делоне; результатом является TIN модель;
- поскольку топология TIN-моделей у разных классов точек будет разной, что неудобно для последующего анализа, то мы преобразуем ее в регулярно-ячеистую форму (GRID) с шагом 0,5 м. Итоговый формат – ArcInfo GRID.

Подобная операция проделывалась по сегментам территории, размер сегмента – 1000×1000 м. На каждый сегмент создавалась цифровая модель рельефа, где каждой ячейке присваивалась высота (абсолютная, над уровнем моря) поверхности земли. Для модели растительности строилась первичная поверхность (верхние точки растительности), из которой (в растровой форме) вычиталась поверхность рельефа. Использовались методы картографической алгебры. Итоговый результат – регулярно-ячеистая модель относительных высот растительности над рельефом.

Подобный подход позволит сразу, без полевых измерений, получить геометрические параметры кроны каждого дерева. Действительно, высота и диаметр кроны напрямую следуют из массива точек – ведь при диаметре кроны в 7–8 м она описывается примерно 160–300 трехмерными точками лазерных отражений, что позволяет исчерпывающе точно описать форму кроны любой породы дерева. Более того, наличие точных данных о форме кроны позволяет применить к этим материалам всю мощь ГИС-анализа поверхностей, что совершенно невозможно сделать, используя ортофотопланы, получаемые классическим способом [Тикунов, Рыльский, 2016].

Примечательно, что без точной модели рельефа под сомкнутыми кронами деревьев определить высоту кроны невозможно. Очевидно, что данные одной аэрофотосъемки в этом случае оказываются совершенно непригодными – они вообще не позволяют определить высоту рельефа под кронами деревьев, и, следовательно, не дают возможности определить высоту крон. Кроме того, оказывается невозможным определить и ширину крон в том месте, где она обычно максимальна – в нижней части полога. А этих участках обычно отсутствует стереоэффект.

Таким образом, применение аэрофотосъемки с одновременным лазерным сканированием позволяет получить принципиально другой набор данных и перейти к решению иных задач.

Создание ортофотопланов местности с использованием ЦМР

После построения ЦМР выполнялось ортотрансформирование фотоснимков с целью устранения искажений съемки, вызванных наличием в поле снимка участков с различной высотой, а также искажений, связанных с отклонением оси съемки от вертикали.

Исправление искажений на снимках, вносимых наличием в полосе съемки участков с различной высотой, производилось в автоматическом режиме посредством попиксельной трансформации изображения с устранением всех видов искажений за дисторсию; смещение главной точки снимка; крен-тангаж-разворот носителя; рельеф.

Как уже было отмечено выше, для выполнения ортофототрансформирования использовались аппаратно измеренные на борту данных об элементах внешнего ориентирования снимков (п.п. 3.2.). Данные о рельефе – в виде ЦМР – были получены в рамках обработки, описанной в п.п. 3.3. Ортотрансформирование изображений производилось в пакетном режиме с использованием программных средств MicroStation Terra Solid. В среде MicroStation Terra Solid осуществлялась ортотрансформация исходных снимков и объединение их в единую геопривязанную мозаику. Построение ортофотопланов производилось по квадратам площадью 1×1 км.

Оценка итоговой точности высотной модели рельефа, произведенная по независимым контрольным точкам (26 штук) позволяет оценить погрешности данных на уровне:

- цифровая модель рельефа – лучше 16 см по высоте (соответствует 1 : 1000);
- точки лазерных отражений – лучше 35 см в плане (соответствует 1 : 1000);
- плановая точность ортофотопланов – лучше 40 см в плане (соответствует 1 : 1000).

Таким образом, можно говорить о возможности получения без использования опорных точек и выезда на местность материалов АФС-ВЛС, обладающих точностью на уровне 1 : 1000, и пригодных для использования в качестве материалов для геопривязки менее детальных данных (например, космических фотоснимков).

Первичная обработка космической съемки сверхвысокого разрешения

Получение и первичная обработка данных космической сканерной съемки (видимый + ближний инфракрасный диапазон) с детальностью 50 см осуществлялось на ту же территорию, что и выполнение аэросъемочных работ. Время съемки при этом отличалось от времени авиационного залета не более чем на несколько недель. Поставлялись данные спутниковых систем WorldView 2 (RGB + NIR каналы), что позволило произвести расчет вегетационных индексов и задействовать весь арсенал возможных инструментов автоматизированного дешифрирования с использованием эталонов и спектральных образов.

При ортотрансформировании снимков использовались RPC-коэффициенты и цифровая модель рельефа, полученная в ходе обработки данных лазерного сканирования [Рыльский, 2016]. Цифровые ортофотопланы, полученные по данным аппаратного измерения элементов внешнего ориентирования в ходе залета АФС-ВЛС, использовались в качестве источника данных для геопривязки с точностью лучше 1 : 2000, что позволило и на этом этапе обойтись без полевых работ.

Подобный подход позволил получить дополнительные материалы (многозональные ортофотопланы космической съемки), практически идентичные по точности привязки данным АФС-ВЛС, что позволило использовать их наравне друг с другом без поправки на пространственные погрешности.

Этап 3. Определение породного состава древостоев и типов леса по данным многоспектральной аэро- и космической фотосъемки

Концептуальные подходы к визуальному определению породного состава и типов леса по данным дистанционного зондирования

При дешифрировании породного состава и типов леса рекомендуется использовать ландшафтный подход к дешифрированию аэроснимков: все объекты, изобразившиеся на аэроснимках, рассматриваются как взаимосвязанные компоненты ландшафта (лесная растительность, рельеф, почва и др.) [Сухих, 2005].

Основными дешифровочными признаками лесной растительности являются тон и рисунок изображения, по ним определяются состав древостоя и типы леса, а также положение растительности в рельефе.

Для лесных сообществ и других объектов, покрытых зеленой растительностью (луг, вырубки), кривая отражения обладает выраженным максимумом в желто-зеленых лучах спектра (0,52–0,58 мкм), минимумом – в красных (0,50–0,08 мкм), резким подъемом и общей высокой отражательной способностью в инфракрасной области спектра. По мере старения яркость молодой листвы и хвои снижается (у лиственных пород быстрее). Разница в спектральной яркости молодой и старой хвои сохраняется до глубокой осени [Сухих, 2005] (рис. 4).

Для изучения лесной растительности, а также оценки степени информативности многозональных аэро- и космических фотоснимков рекомендуются снимки высокого разрешения на уровне 20–50 см на пиксель, позволяющие достоверно дешифрировать насаждения на уровне таксационных выделов и пробных площадей, с учетом структуры древостоев, выполненные в узких диапазонах спектра с эффективными длинами волн: зеленой (0,54 мкм), красной (0,06 мкм) и инфракрасной (0,84 мкм), обладающие наиболее значительными контрастами изображения лесной растительности (рис. 5).

В инфракрасной зоне спектра (0,84 мкм) на аэроснимках летнего залета контрастно дешифрируются лиственные и хвойные породы. В условиях Емельяновского лесничества Красноярского края при относительно однородных почвообразующих породах лиственные породы являются хорошим индикатором степени увлажненности территории (рис. 6).

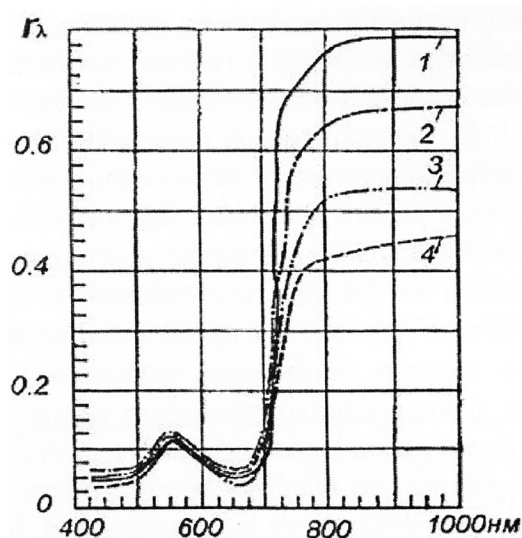


Рис. 4. Кривые коэффициентов спектральной яркости крон деревьев кедр различной степени повреждения:

1 – неповрежденные; 2 – поврежденные на 20–40 %; 3 – поврежденные на 70–80 %; 4 – полностью обесхвоенные

Fig. 4. Spectral intensity coefficients of tree canopies (conifer species) with different level of damages:

1 – non-damaged, 2 – 20–40 % damaged, 3 – 70–80 % damaged, 4 – totally without needles



Рис. 5. Контурное дешифрирование таксационных выделов, выполненное визуально на космическом снимке WorldView 2 в ближнем ИК диапазоне

Fig. 5. Contour interpretation of taxation areas, made interactively using WorldView2 image (CIR image)

В отличие от изображений в инфракрасном диапазоне качество снимков, выполненных в видимой области спектра, в значительной мере зависит от погодных условий. В первую очередь следует отметить влияние воздушной дымки, создающей дополнительную яркость при съемке и снижающей контраст в изображении природных объектов.

В красной зоне спектра, по данным исследований [Сухих, 2005; Дворяшин и др., 2011], несмотря на то, что изображение достаточно контрастно, отсутствуют тональные различия хвойных и лиственных пород.



Рис. 6. Синтезированный космический снимок WorldView в ближнем инфракрасном (NIR), крайнем красном (RE) и красном (R) диапазонах позволяет достоверно дешифровать лесные насаждения по породному составу

Fig. 6. WorldView2 image, synthesized from NIR, RedEdge and Red channels, allows to define forested areas by species

Анализ различных вариантов оптико-электронной обработки показал, что наиболее оптимальным для целей дешифрирования лесной растительности оказалось сочетание каналов с максимумом пропускания 0,54; 0,60; 0,66 и 0,84 мкм. При таком сочетании удалось дифференцировать лесную растительность не только по породному составу, но и выделить границы слабоконтрастных типов лесов (сосняки мшистые и багульниковые). Этому способствует и возможность изменения цветонасыщенности любого из изображений, позволяющая вычленивать интересные контуры выделов.

Концептуальные подходы к автоматизированному определению породного состава и типов леса по данным дистанционного зондирования

Использование космических снимков сверхвысокого разрешения обеспечивает высокую достоверность аналитического и измерительного дешифрирования лесных насаждений при существенном сокращении наземных обследований.

Чаще всего при дешифрировании ДЗЗ используют классификацию объектов, под которой понимают автоматизированное подразделение всех пикселей снимка на группы, соответствующие разным объектам (классам). Распространенным подходом в классификации является использование спектральных признаков, т. е. разделение объектов на основе различий в значениях спектральной яркости. В качестве основного дешифровочного признака при таксации древесных и кустарниковых пород используется вектор много-спектральных яркостей аэро-космических изображений.

$$\bar{P}_{ij} = (P_{ij}^I, P_{ij}^{II} \dots P_{ij}^k)^T$$

Недостатком данного подхода является зависимость спектральной яркости от условий съемки. Для уменьшения влияния внешних факторов выполняются различные преобразования исходных изображений и изменения яркостной структуры. Методы, основанные на преобразовании изображений: вегетационные индексы, метод главных компонент, метод параллелепипедов, метод минимального расстояния, метод расстояния Махалонобиса, метод максимального правдоподобия, метод двоичного кодирования [Сухих, 2005].

Например, нормализованный вегетационный индекс вычисляется как:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR – яркость элемента изображения в инфракрасном канале; RED – яркость соответствующего элемента в красной зоне спектра.

На изображениях, полученных в соответствии с вегетационными индексами, хорошо видна растительность и в ряде случаев даже возможно разделить деревья по породам (рис. 7).

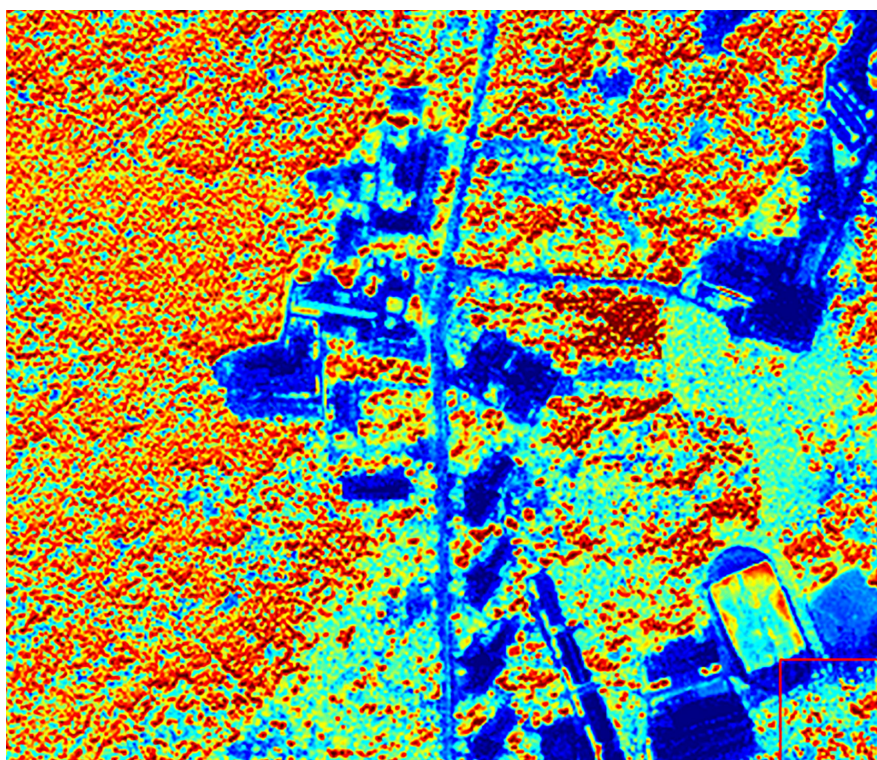


Рис. 7. Космические снимки: индекс NDVI

Fig. 7. Space image: NDVI indice

Преобразование по методу главных компонент улучшает процесс визуального дешифрирования растительности и позволяет разделять лесные массивы на классы по типу растительности (рис. 8).

Основываясь на известных спектральных свойствах различных типов ландшафтов путем визуального (человеко-машинного) дешифрирования, отбираются эталоны, которые являются основой для построения «Дерева решений». Выделяются классы открытой воды, открытого грунта, травяная и кустарниковая растительность, леса с преобладанием хвойных и лиственных пород и другие классы. Затем классы лиственных и хвойных лесов разделяются каждый еще на два класса по яркостям в зеленом спектральном канале, т. е. $Class\ 1 > (b3_{max} - b3_{min})/2$ $Class\ 2 < (b3_{max} - b3_{min})/2$, где $b3_{max}$ – максимальное значение яркости

в 3 (зеленом) канале, $b3_{\min}$ – минимальное значение яркости в 3 канале. Таким образом, данную классификацию нельзя назвать контролируемой. В общей сложности выделяется 11 спектральных классов.

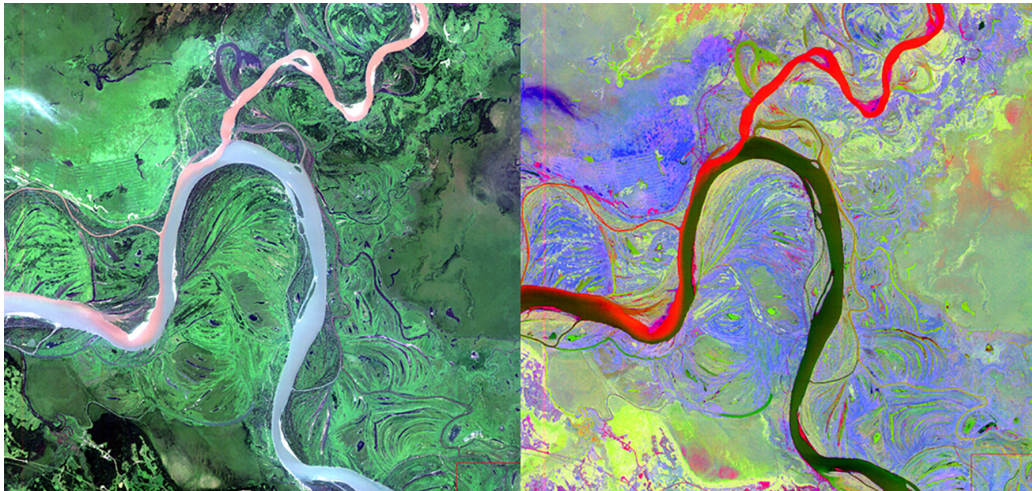


Рис. 8. Преобразование изображений на космических снимках по методу главных компонент

Fig. 8. Recalculation of satellite image using principal component method

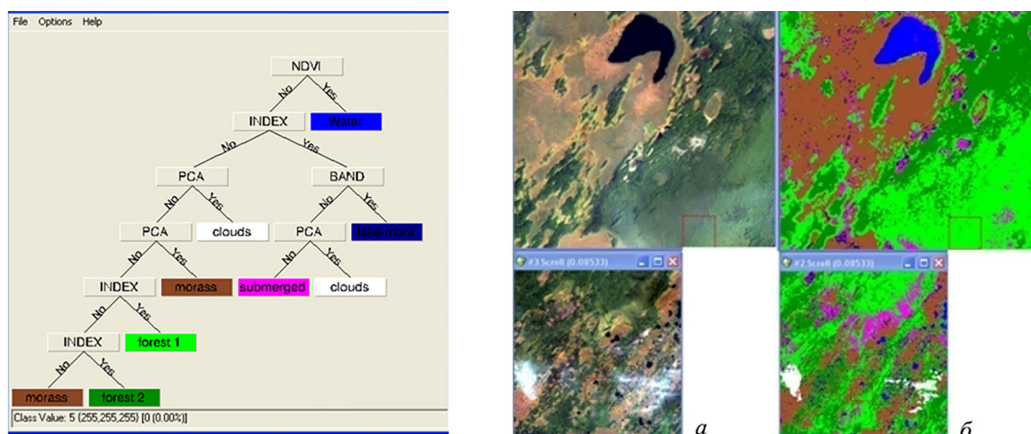


Рис. 9. Структура дерева решений и результат спектральной классификации по алгоритму «дерево решений»

Fig. 9. Structure of decision tree and results of spectral classification using this tree

Как уже было сказано, недостатком использования традиционных методов классификации космических снимков является зависимость спектральной яркости от различных факторов, связанных с условиями съемки, такими как: сезонность, состояние атмосферы, положение носителя, ориентация съемочной камеры, а также ее тип и технические характеристики. Это снижает достоверность дешифрирования и вызывает необходимость выявления и исследования других признаков характеризующих свойства лесной растительности.

Влиянию этих недостатков менее подвержены методы, основанные на использовании структурных признаков. К этим методам относится Фурье и вейвлет-анализ, которые являются мощными средствами обработки данных. Они находят широкое применение в различных сферах, таких как сжатие данных, обработка и синтез различных сигналов, распознавание образов в физике, медицине, стенографии, авиации и других областях.

На рис. 10 представлены изображения фрагментов лесной территории и их Фурье-образы. Видно, что Фурье-образы существенно изменяются в зависимости от типа лесного покрова и соответственно могут служить дешифровочным признаком типовых участков.

На рис. 11 показан пример выделения изменений с помощью вейвлет-анализа.

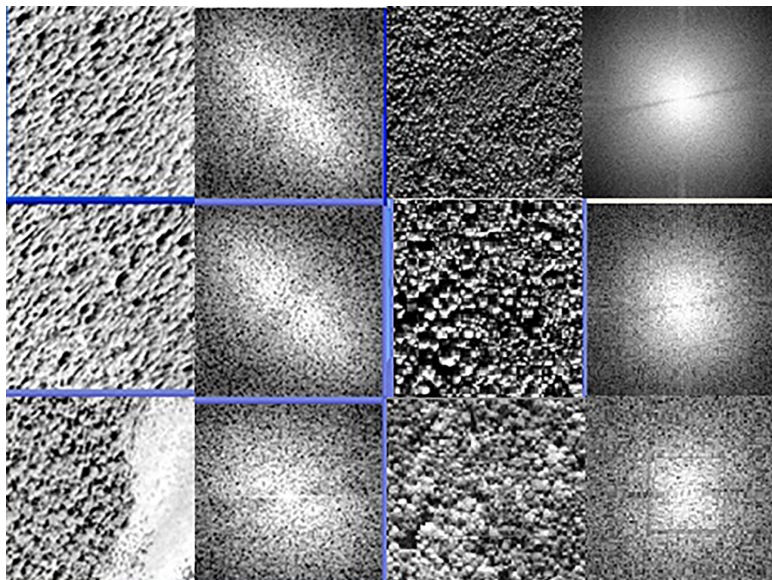


Рис. 10. Изображения фрагментов лесной территории и их Фурье-образы
Fig. 10. Different forest textures and their Furie-diagrams

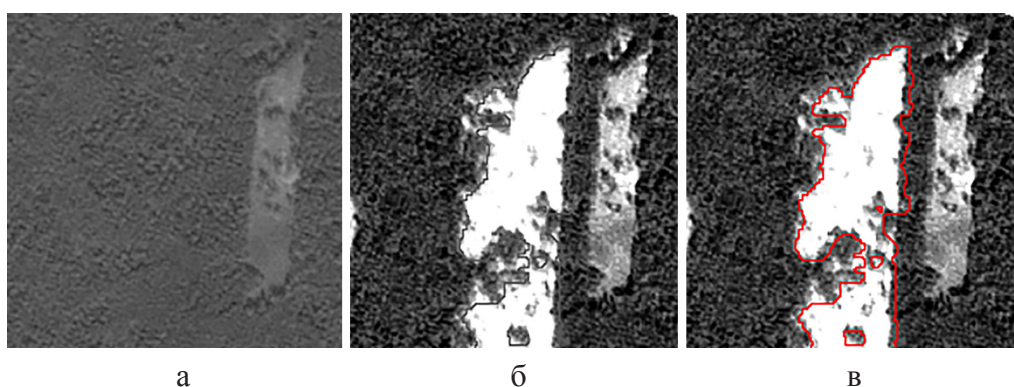


Рис. 11. Автоматизированное выделение изменений методом вейвлет-анализа:
слева направо – начальное состояние, конечное состояние, оконтуривание изменений
Fig. 11. Automated change detection using wavelet analysis:
from left to right – initial condition of territory, final condition of territory, contour of detected changes

Одним из подходов в решении задач автоматизации дешифрования аэрокосмических изображений лесов также является автоматическая объектно-ориентированная сегментация изображений. Для подразделения территории на однородные участки используются алгоритмы объектно-ориентированной сегментации, реализованные в ПК ENVI. Полученные сегменты используются в дальнейшем для интерпретации результатов классификации и размещения пробных площадей.

В данной работе текстурная классификация выполнялась в полуавтоматическом (человеко-машинном) режиме. Вся территория подразделяется визуально на 5 текстурных классов по четвертому (желтому) каналу снимков WorldView-2. Текстурные классы абстрактные, подразделены по степени зернистости изображения (рис. 12, 13).

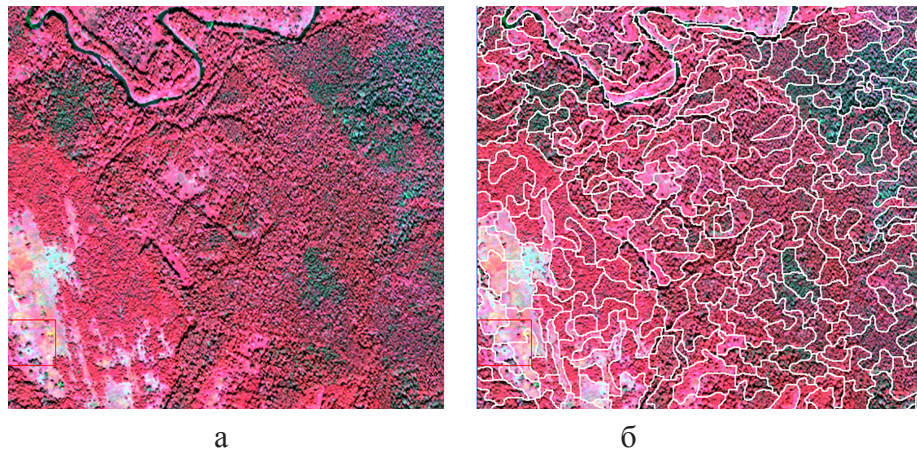


Рис. 12. Автоматизированное разделение лесной территории на сегменты, реализованные в ENVI:

а – исходное изображение; б – сегментированное изображение

Fig. 12. Automated image depiction (similar area detection) using ENVI:
from left to right – source image, detected similar areas

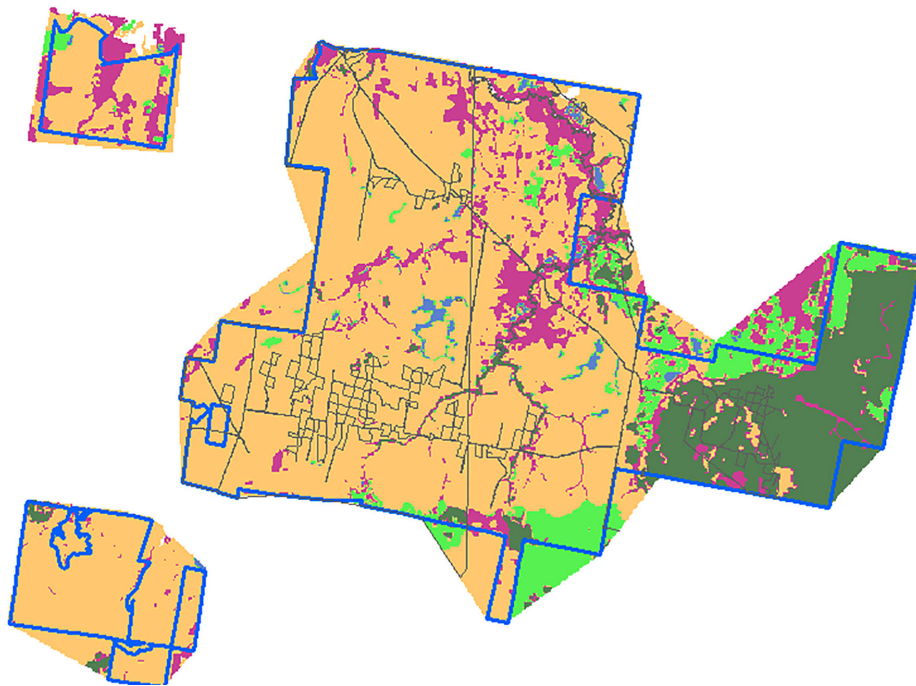


Рис. 13. Результаты полуавтоматической текстурной классификации лесной территории по космическим снимкам WorldView-2

Fig. 13. Results of semi-automatic texture classification of forested land using WorldView2 image

Таким образом, комплексный подход при дешифрировании космических снимков, основанный на совместном использовании методов, базирующихся на анализе спектральных яркостей и методах структурного анализа, можно признать наиболее эффективным при дешифрировании лесных массивов. В настоящее время существует принципиальная возможность определения большинства таксационных показателей земель лесного фонда по космическим снимкам, что позволяет создать автоматизированную систему определения таксационных показателей всех категорий земель лесного фонда по многозональным космическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения.

Этап 4: проведение наземных измерений проведение полевых исследований с закладкой выделов – эталонов для калибровки и контроля полученных данных таксации, осуществленной методом дешифрирования аэросъемки и лазерной локации

Общая вычисленная площадь опытного полигона составила 10 200 га.

Тестовые участки представляют собой ряд пробных площадей, заложенных в натуре с учетом разнообразия насаждений опытного полигона. Таксационно-дешифровочные пробные площади (далее – ТДПП), размером 50×50 м, в количестве 8 штук, отграниченные и обозначенные столбами в натуре, опознанные на АФС, заложены по всем преобладающим древесным породам, присутствующим на территории опытного полигона (Кедр, Сосна – 2 штуки, Лиственница, Ель, Пихта, Береза, Осина).

Сопоставление результатов лазерных аэросъемочных измерений проводилось с данными наземных инструментальных измерений на 30 контрольных площадках (КП) – концентрических инвентаризационных кругах пробных площадей постоянного радиуса (12,62 м) и 8 таксационно-дешифровочных пробных площадей, заложенных в Мостовском и Устюгском участковых лесничествах Емельяновского лесничества Красноярского края. Измерения, выполненные на пробных площадях, принимались за истинные.

При дешифрировании снимков специалистами-таксаторами в человеко-машинном режиме были определены контуры лесотаксационных выделов, породный состав лесных насаждений, класс возраста, средняя высота и диаметр древостоя, группа типов леса, класс бонитета, полнота и запас древесины лесных насаждений, категории и состояние не покрытых лесом, лесных и нелесных площадей. В автоматическом режиме актуализировались средние высоты, средние диаметры ствола деревьев и средние возрасты составляющих древесных пород.

На основании полученных данных также в автоматическом режиме актуализировались: средняя высота яруса древостоя, класс возраста и группа возраста преобладающей древесной породы, средний запас древесины лесного насаждения на 1 га, общий запас древесины лесного насаждения и запасы древесины составляющих древесных пород на лесотаксационном выделе. Не актуализировался: состав лесного насаждения, класс бонитета, полнота, тип леса, тип лесорастительных условий, характеристика подроста и подлеска.

Проверка актуализированных показателей производилась путем осуществления логического и натурного контроля. Логический контроль производится путем анализа актуализированных таксационных описаний, при котором проверялась полнота и правильность описания таксационных характеристик лесотаксационных выделов, соответствие значений актуализированных таксационных показателей лесных насаждений друг другу. Натурный контроль производился путем глазомерно-измерительной таксации 30 лесотаксационных выделов каждой из основных лесообразующих древесных пород, отбираемых из актуализированных таксационных описаний методами случайной или систематической выборки, и сравнения полученных результатов с данными актуализации.

Таким образом, контрольные площадки (КП) использовались в качестве итогового эталона проверки качества автоматизированной и интерактивной обработки данных дистанционного зондирования. Наибольшая случайная ошибка определения верхней высоты древостоя по данным лазерной аэросъемки не превысила – 7,8 %. Случайная ошибка для всех случаев находится в пределах – 59,4 см или – 2,1 %.

При сопоставлении повыдельных значений высот, установленных по лазерным данным, с высотами, определенными в процессе таксации на всю территорию экспериментального полигона, были получены следующие результаты (рис. 14).

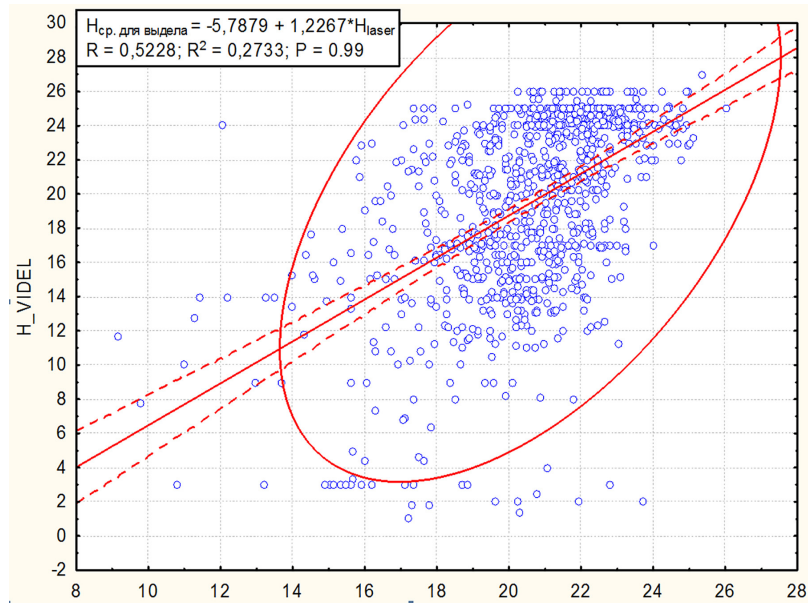


Рис. 14. Зависимость между значениями повыдельных высот древостоев, определенных при таксации (978 таксационных выделов) и по лазерным аэросъемочным данным
Fig. 14. Correlation between average tree heights in taxation areas (978 areas) measured manually and using LIDAR data

Таким образом, на основании сравнения с наземными измерениями на контрольных площадях можно говорить о высокой степени достоверности измерений параметров древостоя, получаемых по данным лазерного сканирования и автоматизированного дешифрирования породного состава по данным космических многозональных съемок.

Этап 5. Разработка технологии автоматизированного дешифрирования, определения величины таксационных показателей лесных участков по данным цифровой аэросъемки и лазерной локации. Данные этапов 3 и 4 использовались при расчетах

Автоматизированное определение средней высоты древостоев и площади покрытия древесного полога в ArcGIS по данным лазерной съемки

Исходными данными для автоматизированного определения средней высоты древостоев по данным лазерной съемки в компьютерной программе ArcGIS служат:

1. Растровый слой высот полога, рассчитанный по данным лазерной съемки;
2. Полигональный слой выделов или пробных площадей.

Для поиска локальных максимумов высот в пологе, соответствующих выступающим из полога вершинам деревьев, использовалась функции пространственного анализа «Spatial Analyst» из набора инструментов гидрологического анализа (ESRI ArcGIS, Spatial Analyst tools, Гидрология) (рис. 15).

Методика определения высот древостоев

- Использовалось последовательное применение функций пространственного анализа поверхности, начиная с растрового слоя высот полога [высота полога] в следующем порядке: «Калькулятор растра» – вычисление обращенной высоты полога ($[высота\ полога * (-1)]$);
- «Направление стока» (Flow Direction) и «Локальное понижение» (Sink) позволяет получить на входе растровое покрытие размещения локальных максимумов высот полога.
- Затем рассчитываются значения высот локальных максимумов в «Калькуляторе растра»: $[Sink] > 0 * [высота\ полога]$.

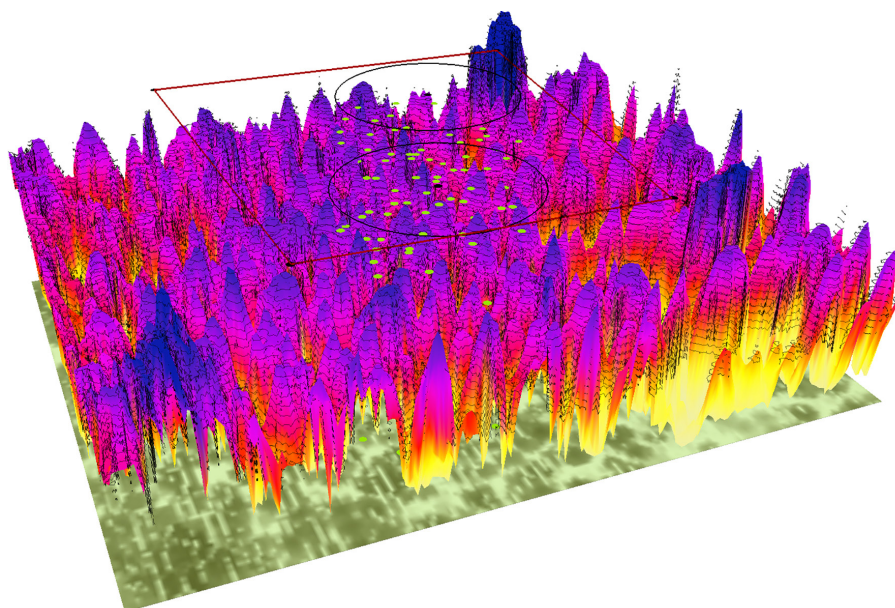


Рис. 15. Трехмерное лазерно-локационное изображение древостоя с наложением границ пробной площади, с маркированными деревьями по материалам наземной инвентаризации

Fig. 15. 3D image of forest made from LIDAR data with overlaid borders of terrestrial test area, points are positions of trees located by terrestrial GPS measurements

- Для слоя выделов или пробных площадей рассчитываются зональные статистики Spatial Analyst «Зональная статистика»: минимальное, максимальное, среднее значения; диапазон и среднеквадратичное отклонение.
- Атрибутивные таблицы полигонов выделов или пробных площадей связываются с таблицей статистик.
- Для каждого выдела или пробной площади вычисляется поле 1/3 высоты от максимальной, вычисленной по статистике выдела.
- Выполняется формирование растрового слоя в "Spatial Analyst": 1/3 высоты от максимальной, вычисленной по статистике выдела.
- Выполняется пересчет статистики для растрового слоя высот в "Spatial Analyst": $[высота\ полого] > [max_h_vydel] / 3$
- Расчет растрового слоя высот выполняется в «Калькуляторе растра»: $[Sink] > 1/3 * [максимумы\ высот]$.

Исходными данными для автоматизированного определения площади покрытия [Варыгин и др., 2012] древесного полога по данным лазерной съемки в компьютерной программе ArcGIS служат:

1. Растровый слой высот полога, рассчитанный по данным лазерной съемки.
2. Полигональный слой выделов или пробных площадей.

Для поиска локальных максимумов высот в пологе, соответствующих выступающим из полога вершинам деревьев, использовалась функции пространственного анализа "Spatial Analyst" из набора инструментов гидрологического анализа (ESRI ArcGIS, Spatial analyst tools) (рис. 16).

Для слоя выделов или пробных площадей рассчитываются зональные статистики в Spatial Analyst «Зональная статистика» (таблица *.dbf) – общая площадь покрытия для каждого полигона.

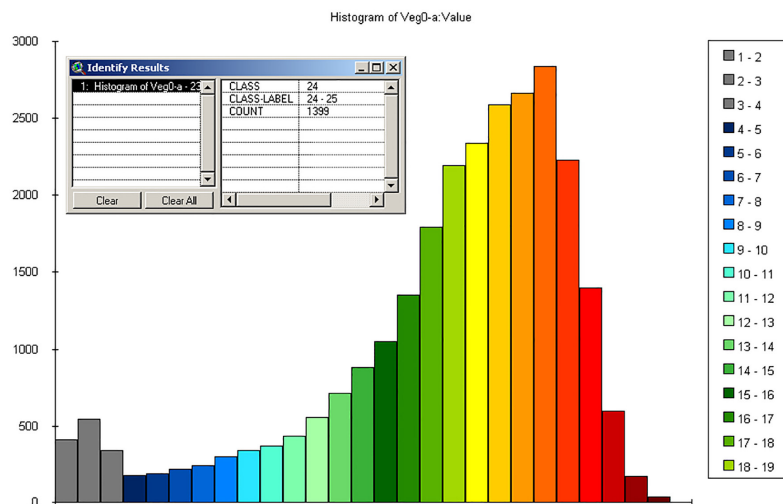


Рис. 16. Гистограмма распределения деревьев по высотам в пределах таксационного выдела

Fig. 16. Histogram of tree height distribution in one of the taxation areas

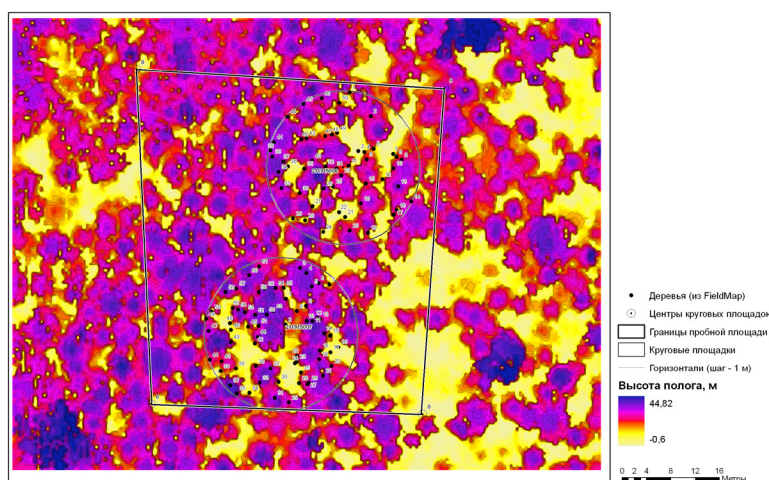


Рис. 17. Автоматически созданное плановое отображение площади проекции древесного полога по лазерно-локационным данным

Fig. 17. 2D image of canopy projections formed automatically using LIDAR data

Взаимосвязи таксационно-дешифровочных показателей древостоев

Определенный интерес представляет изучение закономерных взаимосвязей между таксационными признаками древостоев на опытном полигоне съемки. Данное направление исследований не утратило своей актуальности и по сегодняшний день, в связи с развитием новых методов дистанционного зондирования и моделирования структуры и динамики древесных запасов и фитомассы лесов [Korpela, 2008].

Поиск унифицированных регрессионных зависимостей таксационных показателей древостоев и обобщающих математических моделей для крупных лесных территорий, как показывают предыдущие исследования, является возможным и представляет интерес в связи с интенсивным развитием методов дистанционного зондирования леса и, прежде всего, лазерной локации и цифровой аэро- и космической фотосъемки.

В целях повышения точности определения таксационных признаков древостоев данные взаимосвязи требуют дальнейшего уточнения и конкретизации имеющихся данных в связи с особенностями таксационной и морфологической структуры насаждений и сопоставления

таксационных показателей, дешифрируемых по данным дистанционного зондирования с фактическими данными, полученными путем наземных измерений на пробных площадях.

Ниже приведены некоторые результаты исследований по определению таксационно-дешифровочных показателей древостоев, выполненных на экспериментальном аэросъемочном полигоне в Емельяновском лесничестве Красноярского края.

Исходными данными для расчета обобщенных уравнений (математических моделей) взаимосвязей послужили материалы массовой выборочной глазомерно-измерительной таксации насаждений опытного полигона (около 1,3 тыс. таксационных выделов), местные таблицы хода роста модальных и нормальных древостоев, материалы 8 таксационно-дешифровочных пробных площадей и 30 концентрических инвентаризационных кругов пробных площадей постоянного радиуса (12,62 м), заложенных в границах опытного полигона в период выполнения данной работы.

Предварительно были определены средние диаметры и основные статистики в насаждениях с одинаковой высотой, полнотой и производительностью. Установлено, что изменчивость средних диаметров в однородных по основным таксационным показателям выделах находится в пределах 6–14 %, а с увеличением среднего возраста древостоя варьирование средних диаметров уменьшается. В учет принимались выделы с участием главной породы не менее 3-х единиц в составе. На каждое значение средней высоты и полноты была произведена выборка в количестве не менее 30 вариант средних диаметров древостоев

С использованием пакета программ статистического анализа и обработки экспериментальных данных Statistica 8.0 был выполнен парный корреляционный и многофакторный дисперсионный анализ, который позволил установить следующее:

1. Совместное влияние организованных факторов – средней высоты, полноты и бонитета на средний диаметр древостоев достаточно высоко и составляет 97 % ($R = 0,9847 \pm 0,017$).
2. Влияние средней высоты древостоя на диаметр составило 84 %. Парная связь между признаками прямая, тесная ($R = 0,916 \pm 0,025$).
3. Влияние полноты составило 7,2 %. Парная корреляция обратная, слабая ($R = -0,269 \pm 0,068$). При одинаковых значениях высоты и производительности средний диаметр больше в древостоях с меньшей полнотой. Это явление можно объяснить повышенной энергией прироста по диаметру в разреженных насаждениях, по сравнению с высокополнотными.
4. Влияние производительности (класса бонитета) на средний диаметр древостоя составило 6,4 %. Парная связь между признаками обратная, слабая ($R = -0,2529 \pm 0,066$). При увеличении производительности насаждения и стабилизированных значениях высоты и полноты наблюдается некоторое уменьшение среднего диаметра древостоя.
5. Влияние неучтенных факторов незначительно и составило 3 %. Достоверность влияния организованных признаков установлена на третьем пороге доверительной вероятности ($P = 0,999$).

Апробация полученных уравнений проводилась по материалам 13 пробных площадей, заложенных в Емельяновском лесничестве Институтом леса СО РАН.

При сопоставлении фактических значений средних диаметров и найденных по уравнению систематическая ошибка составила $\pm 0,02$ %, случайная $\pm 5,02$ %, ошибка для всех случаев $\pm 1,3$ % (табл. 3).

При использовании полученных уравнений точность определения средних диаметров древостоев не выходит за допустимые пределы при наземной таксации глазомерным путем и отвечает требованиям Методических указаний по проведению государственной инвентаризации лесов.

Полноту насаждения (P) рекомендуется определять через сомкнутость крон (C), так как эти показатели находятся в тесной корреляционной связи. Так, для чистых по составу,

спелых сосняков III–IV классов бонитета района исследований эта зависимость выражается уравнением:

$$P = 1,75C - 0,07$$

$$R = 0,895; \sigma = 0,050.$$

Таблица 3. Средние диаметры древостоев, фактические и вычисленные
Table 3. Average log diameters: actual and calculated using equations

№ п/п	Состав древостоя	Бонитет	Н, м	Полнота	D _{1,3} , см		Отклонение	
					фактический	вычислен	см	%
1	10С ед., Б, Ос	III	23,6	0,63	31,6	33,0	–1,4	–4,4
2	10С	IV	18,8	0,42	23,9	24,2	–0,3	–1,3
3	10С ед. Е, К	III	24,4	0,73	33,7	34,5	–0,8	–2,4
4	8С2Л ед. К, Е	III	23,1	0,40	33,0	33,7	–0,7	–2,1
5	9С1Л	IV	18,6	0,69	21,7	21,0	0,7	3,2
6	9С1Л ед. Е, Б,	III	23,6	0,79	32,4	31,2	1,2	3,7
7	10С	IV	14,2	0,75	14,8	13,6	1,2	8,1
8	10С + Л	IV	22,6	0,70	29,8	29,6	0,2	0,7
9	9С1Б + К	IV	20,2	0,74	23,2	23,7	–0,5	–2,2
10	10С ед. Б	IV	22,0	0,81	28,3	27,4	0,9	3,2
11	7С3Л ед. К, Е	III	26,2	0,89	34,9	36,8	–1,9	–5,4
12	10С + К, Б	III	14,6	0,80	14,5	13,1	1,4	9,7
13	10С + Л	III	21,5	0,69	28,0	27,3	0,7	2,5

Рассчитаны уравнения связи полноты и сомкнутости полога и их табулированные значения для кедровых, сосновых и березовых древостоев района исследований (табл. 4, 5).

Таблица 4. Аналитическое выражение зависимости между полнотой и сомкнутостью крон древостоев

Table 4. Equations between forest density and canopy density

Древесная порода	Уравнение связи	η	F	σ	C _i ≤ C ≤ C _i
Сосна	$P = -0,0043 + 2,0028C - 0,7439C^2$	0,838	4,27	0,077	$0,15 \leq C \leq 0,70$
Кедр	$P = 0,1094 + 1,2684C + 0,1218C^2$	0,686	3,47	0,089	$0,15 \leq C \leq 0,70$
Береза	$P = 0,2548 + 0,8554C + 0,1140C^2$	0,892	5,26	0,052	$0,15 \leq C \leq 0,80$

Примечание. Р – относительная полнота; С – сомкнутость крон; η – множественное корреляционное отношение; F – критерий Фишера; σ – среднеквадратическая ошибка уравнения; C_i ≤ C ≤ C_i – пределы действия уравнения по сомкнутости.

Таблица 5. Полнота насаждений при различных значениях сомкнутости крон
Table 5. Crop density and canopy density comparison

Древесная порода	Сомкнутость крон													
	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
Сосна	0,28	0,37	0,45	0,53	0,61	0,68	0,75	0,81	0,87	0,93	0,98	1,03	–	–
Кедр	0,30	0,37	0,43	0,50	0,57	0,64	0,70	0,77	0,84	0,91	0,98	1,06	–	–
Береза	0,33	0,43	0,47	0,52	0,57	0,62	0,66	0,71	0,76	0,81	0,86	0,91	0,96	1,01

Сомкнутость крон верхней части полога древостоя рекомендуется определять по данным лазерного сканирования или по цифровым аэро- и космическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения [Сухих, 2005; Дворяшин и др., 2011].

Проверка рассчитанного уравнения на тестовых участках, не вошедших в основной материал, показала приемлемую для целей практики точность. Во всех случаях ошибка не превысила 0,1 единицы полноты, что также согласуется с требованиями действующих Методических указаний по инвентаризации лесов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты практической апробации метода авиационной лазерной локации в сочетании с цифровой аэро- и космической фотографической съемкой и спутниковым геопозиционированием, говорят о перспективности использования указанных методов для целей анализа и моделирования структуры и нарушенности лесного покрова, инвентаризации, оперативного экологического мониторинга, информационного обеспечения кадастра лесных земель и контроля лесопользования. Метод обеспечивает дистанционную оценку состояния и динамики лесных ресурсов с высокой эффективностью, при минимуме наземных работ и значительной экономии времени и финансовых средств.

Структура, объемные показатели стволов, запас и фитомасса деревьев и древостоев по лазерно-локационным данным («лазерным портретам» деревьев и древостоев) и цифровым аэрофотоснимкам определяются с достаточной степенью достоверности и точности средствами визуализации и трехмерной компьютерной графики в программной среде ArcGis и моделированием аллометрическими функциями на основе регрессионных связей с морфометрическими показателями деревьев – высотой и диаметром стволов, диаметром и вертикальной протяженностью крон.

При лазерном сканировании лесного покрова оценка запасов древостоев в каждом конкретном случае сводится к определению соотношений между объемами стволов по породам и их высотой и диаметрами крон, которые, в свою очередь, составляют 87–99 % объясненной изменчивости древесного запаса.

При включении в регрессионные модели высот и диаметров крон деревьев остается некоторая доля неучтенного варьирования, что характерно для высоко сомкнутых насаждений, где диаметры крон на «лазерных портретах» древостоев читаются не четко или не полностью. В данных случаях характеристику запаса древостоев – распределение стволов по толщине рекомендуется аппроксимировать через распределение по диаметрам крон [Каплунов, 2001], которым характерна автокорреляция и высокая степень регрессионной сопряженности.

При сравнении расчетных (лазерных) значений запасов древостоев с соответствующими фактическими, определенными по данным измерений на пробных площадях, варьирование оказалось в пределах допусков Методических рекомендаций. Отклонения не превышают 7–10 % от наземных определений. Разброс объясняется варьированием диаметров стволов в сомкнутых насаждениях, где происходит частичная «потеря» отраженных импульсов от крон деревьев низких рангов и подчиненной части полога древостоев. Решение данной проблемы требует проведения научно-исследовательских работ на предмет изучения оптимальности режимов съемки в насаждениях со сложной вертикальной и горизонтальной структурой древесного полога.

ВЫВОДЫ

Применение описанной методики и технологии воздушной лазерной и цифровой аэрофотосъемки, совмещенной со спутниковой навигацией и геопозиционированием, а также с информацией, получаемой со спутниковых цифровых снимков и интегрированных в геоинформационных системах для целей инвентаризации и мониторинга лесов, позволяет с достаточной степенью точности проводить дистанционную таксацию лесов при минимуме наземных работ и значительной экономии времени и материальных средств.

Экономическая эффективность предлагаемого метода обеспечивается достаточной точностью измерений и возможностью их повторимости (проверки), а также значительным снижением трудоемкости и сложности выполнения работ (как полевых, так и камеральных дешифровочных) за счет высокого уровня автоматизации обработки данных, получаемых в процессе лазерной и цифровой аэрофотосъемки. Объем полевых работ при этом значительно сокращается и необходим лишь для калибровки результатов лазерного сканирования, поддержки интерактивного дешифрирования и установления базовых закономерностей изучаемого объекта.

Рекомендуется для более точного и уверенного разделения древостоев на цифровых аэрофотоснимках по породному составу и производительности использовать синтезированные цветные изображения в комбинации – ближний инфракрасный (NIR), крайний красный (RE) и красный (R) каналы аэрофотокамеры. Вместе с тем, определение конкретных параметров диапазонов (длины волны) требует проведения дополнительных исследований и уточнений для различных типов и условий местопроизрастаний и сочетания древесных пород.

Рекомендуется лазерную и цифровую аэрофотосъемку проводить в период активной вегетации и максимального облиствления крон деревьев (полный лист), в конце июня – начале июля и в период максимального солнцестояния по зениту, для того, чтобы избежать существенного затенения снимаемых насаждений и потери информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при содействии Института Леса им. М.В. Сукачева.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed in a collaboration with Forest Institute, Krasnoyarsk.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варыгин К.А., Данилин И.М., Рыльский И.А. Инвентаризация и мониторинг лесов на основе лазерной локации, цифровой аэро- и космической фотосъемки и спутникового геопозиционирования // Материалы третьей Междунар. практ. конф. по лесоустройству. Новосибирск, 2012. С. 56.
2. Данилин И.М., Фаворская М.Н. Моделирование структуры лесного покрова и рельефа местности по данным лазерной локации // Лесная таксация и лесоустройство. Междунар. науч.-практ. журнал. 2011. № 1–2. С. 40–47.
3. Дворяшин М.В., Скудин В.М., Корец М.А. Аэрокосмические методы мониторинга лесных территорий. Опыт применения в Восточной Сибири. Красноярск.: Литера-Принт, 2011. 152 с.
4. Каплунов В.Я. Сопряженность распределений деревьев по поперечнику крон и диаметру стволов // Лесоведение. 2001. № 3. С. 63–69.
5. Малеванная М.С., Рыльский И.А. Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований // Геодезия и картография. М., 2014. Т. 5, № 4. С. 23–34.
6. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: Учебное пособие. 2-е изд. М.: Геокосмос, 2007. 229 с.
7. Капралов Е.Г., Кошкарёв А.В., Тикунов В.С. / Под ред. В.С. Тикунова. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.
8. Рыльский И.А. Лазерное сканирование и космическая съемка – соревнование или партнерство // Геоматика. М., 2016. № 1. С. 15–18.
9. Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве // Учебник для вузов. Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2005. 392 с.

10. *Тикунов В.С., Рыльский И.А.* Перспективы использования комплексов воздушного лазерного сканирования для картографирования лесов // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о земле. 2016. Т. 15, № 2073–3402. С. 104–113.
11. *Тикунов В.С., Капралов Е.Г., Кравцова В.И., Лурье И.К., Ильясов А.К., Рыльский И.А.* Информатика в географии, экологии и природопользовании. М.: Академия, 2013. 572 с.
12. *Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2007. V. 73, No 2. P. 109–112.
13. *Holmgren A., Persson J.* Identifying species of individual trees using airborne laser scanner // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 90, No 4. P. 415–423.
14. *Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112, No 10. P. 3891–3897.
15. *Soille P.* Morphological Image Analysis: Principles and Applications. 2nd edition. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2003.

REFERENCES

1. *Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2007. V. 73, No 2. P. 109–112.
2. *Danilin I.M., Favorskaya M.N.* Using LIDAR for modelling forest structure and DEM. Lesnaya taksacia I lesoustroystvo. 2011. No 1–2. P. 40–47 (in Russian).
3. *Dvoriashin M.V., Skudin V.M., Korez M.A.* Aerospace methods of monitoring for forested areas. Krasnoyarsk: Litera-Print, 2011. 152 p. (in Russian).
4. *Holmgren A., Persson J.* Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. Remote Sensing of Environment. 2004. V. 90, No 4. P. 415–423.
5. *Kaplunov V.Y.* Contingency of tree distribution by log and canopy diameters. Lesovedenie. 2001. No 3. P. 63–69 (in Russian).
6. *Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S.* Osnovy geoinformatiki. M.: Akademia, 2004. 480 p. (in Russian).
7. *Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112, No 10. P. 3891–3897.
8. *Malevannaya M.S., Rylskiy I.A.* Terrestrial laser scanning methods – new approaches to information provision of geographic researches. Geodezia I cartographia. M., 2014. V. 5, No 4. P. 23–34 (in Russian).
9. *Medvedev E.M., Danilin I.M., Melnikov S.R.* Laser scanning of land and forests. M.: Geokosmos, 2007. 229 p. (in Russian).
10. *Rylskiy I.A.* Laser scanning and satellite imagery – competition or partnership. Geomatika. M., 2016. No 1. P. 15–18 (in Russian).
11. *Soille P.* Morphological Image Analysis: Principles and Applications. 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2003.
12. *Sukhih V.I.* Aerospace methods in forest industry and landscape installation. Yoshkar-Ola: Izdatelstvo MarGTU, 2005. 392 p. (in Russian).
13. *Tikunov V.S., Kapralov E.G., Kravtsova V.I., Lurie I.K., Iliasov A.K., Rylskiy I.A.* Informatics in geography, ecology and environmental management. M.: Akademia, 2013. 572 p. (in Russian).
14. *Tikunov V.S., Rylskiy I.A.* Perspectives of using airborne laser scanning systems for forest mapping. Izvestia Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria Nauki o zemle. 2016. V. 15, No 2073–3402. P. 104–113 (in Russian).
15. *Varygin K.A., Danilin I.M., Rylskiy I.A.* Inventarization and forest monitoring using LIDAR, aerospace imagery and global navigation systems. Materialy 3 Mejdunarodnoy prakticheskoy konferencii po lesoustroystvu. Novosibirsk, 2012. P. 56 (in Russian).

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВИРТУАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ СРЕДЫ И КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОЙ ЗЕМЛИ

GEOINFORMATION MODELING, VIRTUAL GEOGRAPHICAL ENVIRONMENTS AND THE CONCEPT OF DIGITAL EARTH

Jean A. Doumit¹

DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-241-249

EVALUATION OF MULTISCALE TERRAIN ROUGHNESS BASED ON UAV DATASETS: A CASE OF A LEBANESE REGION

ABSTRACT

Surface Roughness is an important geomorphological variable, no single definition exists; however, within the context of geomorphometry, we use surface roughness as an expression of variability in a topographic surface at a given scale.

The obtaining of a Digital Surface models (DSMs) at different scales and levels before the appearance of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) was very rare or impossible. UAV's with advanced photogrammetry softwares which produce high-resolution Digital Surface Models. In this paper, we tested terrain roughness at multiscale DSM generated from six different UAV flight heights of 20, 40, 60, 120, 240 and 360 meters.

We tested an easily calculated terrain roughness index (TRI) and the vector roughness measure (VRM) which provides an objective quantitative measure of topographic heterogeneity.

TRI and VRM values of the six DSMs were correlated to understand the influence of spatial resolution on terrain heterogeneity, as a result of statistics and regression analysis the first three high-resolution DSMs save the degree of roughness and the last three generated from flight heights of 120, 240 and 360 meters lost the roughness degree with the loss of scale and spatial resolution.

KEYWORDS: UAV, DSM, Ruggedness.

INTRODUCTION

Surface roughness could be defined as a value ranging between smooth and complex surfaces, this paper specifically focuses upon the broad area at different scales of general geomorphology [Evans, 1729] and, more explicitly, on the quantification of surface-roughness variability using Digital Surface Models (DSMs) generated from UAV. Surface roughness is treated here as a geomorphometric variable influencing at the physiography of the terrain, not as a parameter due to the precision and accuracy of the generated digital surface models.

¹ Lebanese University, Faculty of literatures and human sciences, Beirut, Fanar, Lebanon, *e-mail:* jeandoumit@gmail.com

Measurement of terrain roughness is important for a number of disciplines of terrain quantifying characteristics have been evolving within fields such as geomorphology, engineering, biologists and ecologists [Doumit, 2017].

In terrains descriptions, roughness parameters should be established that can be used to describe surface irregularities and they should fulfill some requirements. The parameters should be descriptive and give the reader an image of the physical characteristics of the study area and should be easily measurable in the field so that large sites can be quickly sampled. If possible, roughness parameters should be selected that require similar types of field measurements with a minimal amount of equipment. Nowadays with the appearance of the Unmanned aerial vehicles and the advanced of Geographical Information Systems these parameters can be measured and compared at several different scales, and suitable for statistical and numerical analysis.

The simplest traditional method of terrain complexity is the profile method, by providing multi-sections on the terrain it is very easy to evaluate roughness of the terrain.

Hobson among the first scientists who calculated terrain Roughness using computer technologies, he wrote in Fortran language modules for calculating roughness parameters such as: comparison of the estimated actual surface area with the corresponding planar area; bump elevation frequency distribution; and the distribution of planes [Hobson, 1967].

With the fast evolution of GIS and geoinformatics methods, many scientists worked on the development of other methods for calculating terrain roughness such as: the application of Fourier analysis [Stone, Dugundji, 1965] geostatistics [Herzfeld et al., 2000], the fractal dimension of a surface [Elliot, 1989; Doumit, Pogorelov, 2017].

From the first recognized traditional methods for quantifying roughness was the land surface roughness index (LSRI) developed by [Beasom et al., 1983]. This index is a function of the total length of topographic contour lines in a given area.

[Riley et al., 1999] developed a terrain roughness index (TRI) that is derived digital elevation models (DEM) implemented in a geographical information system (GIS). TRI uses the sum of changes in elevation within an area as an index of terrain roughness.

Based on [Hobson, 1972] method developed for measuring surface roughness in geomorphology, a Vector Roughness Measure (VRM) quantifies terrain roughness by measuring the dispersion of vectors orthogonal to the terrain surface.

In this study we tested the regression between VRM and TRI values at the six different levels and we provided a correlation analysis between the raster datasets of VRM, and TRI, to examine their distributions within each scale, we generated scatterplots and calculated descriptive statistics (Min, Max, SD, skewness, kurtosis and r^2) to characterize terrain heterogeneity at different level.

MATERIALS AND METHODS

A mountainous region of 1700 m an average elevation above the sea level occupying an area of 2 hectares, Zaarour region on the western Lebanese mountainous chain characterized by a bare land without urbanizations and vegetation cover. The benefit of the study bare area is that Digital Surface Models are acting as Digital Terrain models, because of the empty area excluded from manmade activities and vegetation.

At big scale the micro-relief of the study area highlighting small terrain structure (ridges and valleys) due to small streams from snow melting processes, these structures are very narrow and gives the terrain a heterogeneity of textures and forms influenced by the scale changing.

Drones have been widely used as an apparatus for aerial photography, for many agricultural and terrain analysis applications, one of the advantages of UAV is the availability and fast photogrammetry mission execution at different altitudes.

An autopilot DJI Phantom 3 with a camera of 14 megapixels at a focal length of 3.61 mm flies the study area at different Heights. The flight paths of all missions were identical and designed in a mobile application called Litchi, the study area and the flight parameters (coordinates, height, time, etc...). All datasets (photos) of the six missions of different flight heights were processed in Agisoftphotoscan software for the extraction of Digital Surface Models (DSM). Before starting the aerial surveying, well-distinguishable 10 control points were evenly distributed within the area of interest for scaling and georeferencing the resulted data. Ground control points (GCP) were collected with Global Positioning System (GPS) in stereographic coordinate system.



Fig. 1. Google map background with the study area location of Zaarour region (Lebanon) figure from [Doumit, Pogorelov, 2016]

The drone took Aerial photography with 60 % overlapping and 50 % side lapping. SfM-based 3D methods operate on the overlapping images. The drone flight in an autonomous way, defined by waypoints to avoid image coverage gaps, every surface that will be reconstructed needs at the minimum to be covered by at least 2 images taken from different positions.

After executing the flight missions and data capturing, image processing was made in Agisoft Photoscan, following these steps: Control points establishment, Image capturing, Feature detection and image alignments, points cloud generation surface interpolation and Digital Surface Models generation.

The project constituted from field and office parts, the field works allowing us the installation and surveying of ground control points. The office part of data processing repeated 6 times englobing the above listed workflow steps, begins from key points detection ending by the generation of the six DSM's.

Fig. 1 shows six DSM of the study area of different spatial resolutions, FH-20 of 20 meters' flight height with a very high-resolution data set highlighting all the terrain details even rocks texture, passing by FH-60 the terrain is smoothed with some concave and convex areas and ending by FH-360 of 360 meters'.

These 6 DSM can be classified visually from fig. 2 by rough and smooth, FH-20, FH-40 and FH-60 for rough and FH-120, FH-240 and FH-360 for smooth, also figure 2 constitute an interval of scales and smoothness showing the generalization at different scales.

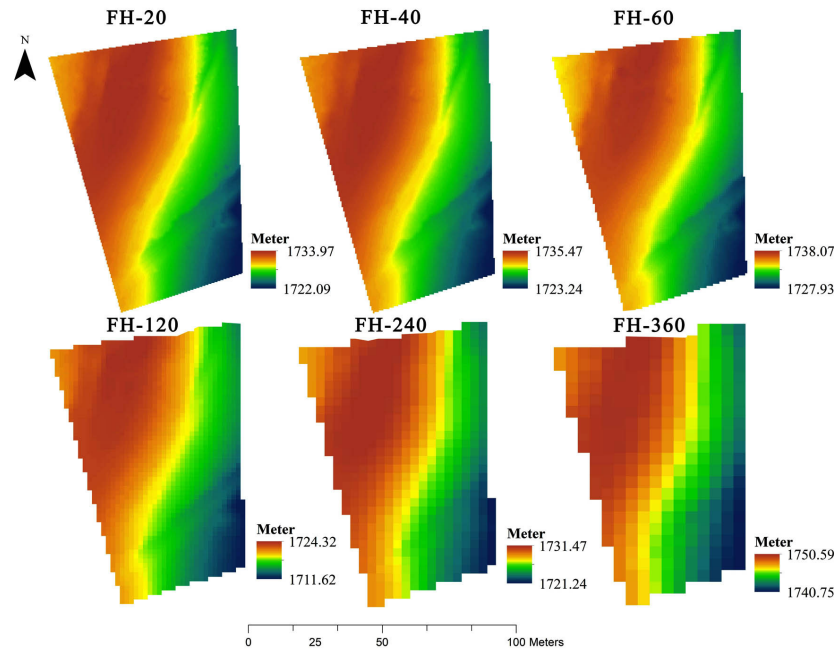


Fig. 2. Multiscale DSM obtained from image acquisition and processing

Table 1. Spatial resolutions of the six generated DSMs

DSM	Spatial resolution (m)
FH-20	0.4
FH-40	0.6
FH-60	0.80
FH-120	1.70
FH-240	3.20
FH-360	4.50

As per table one different flight altitude lead to different spatial resolution (pixel size), the higher spatial resolution of 0.40 m which showing all terrain details and textures, otherwise the lower spatial resolution of 4.50 m quite good for geomorphological analysis at a local scale.

Our study is independent from DSM accuracy and precision it will test roughness at six different levels expressed by flight height of a drone at 20, 40, 60, 120, 240 and 360 meters. The flight datum was calculated from the same takeoff points of the drone of the six flights.

As this study is restricted to evaluating array-based geomorphometric methods for calculating surface Roughness, an input DSM is required for further analysis. DSM selection criteria were based on spatial resolution, with a high-spatial-resolution DSM required in order to test the heterogeneity across a range of resolutions and within the study area presenting multiscale Roughness features.

The Terrain Roughness Index (TRI) based on an index described by [Riley et al., 1999] that calculated the sum change in elevation between a grid cell and its eight neighboring grid cells table 2 by squaring the eight differences in elevation, summing the squared differences, and taking the square root of the sum.

[Valentine et al., 2004] calculated the average of the absolute values of the eight differences in elevation, by using the TRI equation given as:

$$TRI = [abs\{grid(0,0) - grid(-1,-1)\} + abs\{grid(0,0) - grid(0,-1)\} + abs\{grid(0,0) - grid(1,-1)\} + abs\{grid(0,0) - grid(1,0)\} + abs\{grid(0,0) - grid(-1,1)\} + abs\{grid(0,0) - grid(0,1)\} + abs\{grid(0,0) - grid(-1,0)\} + abs\{grid(0,0) - grid(1,1)\}]/8 \quad (1)$$

Table 2. 3×3 grid of the TRI equation values

1, -1	0, -1	1, -1
-1, 0	0, 0	1, 0
-1, 1	0, 1	1, 1

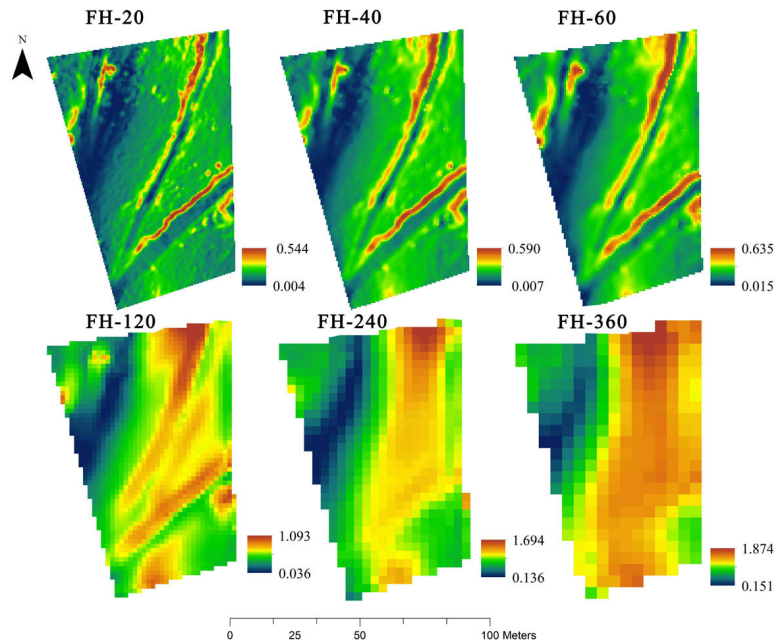


Fig. 3. TRI maps at different flight altitudes 20, 40, 60, 120, 240 and 360 above the datum

TRI high values at FH-20 shows details in ridges and water erosion traces, in FH-60 structures are very smoothed, FH-120 shows the pixel's boundaries and at FH-360 the map is totally pixelated. It is very clear in this map the disappearance of the small structures with the loss of spatial resolution, running from coarse to smooth then to pixelated surfaces.

Based on a method developed for measuring surface roughness in geomorphology [Hobson, 1972], the surface of elevation values can be divided into planar triangles very similar to Triangulated Irregular Network (TIN models) and normal to these planes represented by unit vectors. Values of vector mean strength (R), and dispersion (k) can be calculated for each square cell. In smooth areas, with similar elevations, the vector strength is expected to be high and the vector dispersion to be low since the vectors will become parallel fig. 4. In rough areas, the nonsystematic variation in elevation will result in low vector strength and high vector dispersion. The inverse of k can be a better representation of roughness [Mark, 1975].

Based on slope and aspect definitions, normal unit vectors of every grid cell of a digital elevation model (DEM) are decomposed into x, y and z components.

DSM resolution dependent from the flight height, in fig. 4 the topographic surface profile showing the terrain variation, at high spatial resolution vectors are very dense and orientated in several directions otherwise for low spatial DSM resolution as per example FH-360 vectors and far from each other perpendicular to segments expressing geometrical terrain forms.

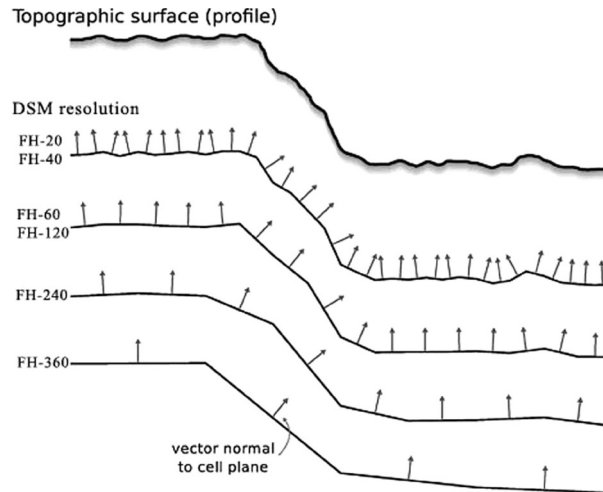


Fig. 4. Vector dispersion method used to calculate surface roughness at different scales for a topographical surface.

Graphic from [Grohmann et al., 2011]

The translation from the vector dispersion traditional method applied on topographic maps to Vector Roughness Measure (VRM) calculated by GIS algorithms, was done by applying the method and formulas used by [Veitinger et al., 2016]. Based on slope and aspect definition, the normal unit vector of every grid cell of a Digital Surface Model is decomposed into x, y, and z.

A resultant vector R is then obtained for every pixel by summing up the single components of the center pixel and its neighbors using a moving window technique.

$$R = \sqrt{(\sum x)^2 + (\sum y)^2 + (\sum z)^2} \quad (2)$$

The magnitude of the resultant vector is then normalized by the number of grid cell and subtracted from 1

$$VRM = 1 - \frac{R}{9} \quad (3)$$

where VRM is the vector ruggedness measure [Veitinger et al., 2016].

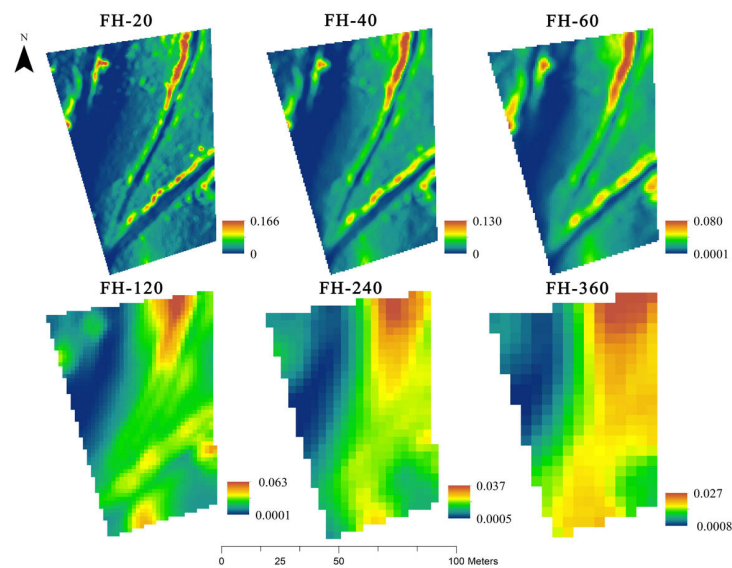


Fig. 5. VRM maps of the six DSMs

Fig. 5 shows the six VRM maps generated from DSM, by using formulae 3, for the first three high spatial resolution FH-20, FH-40 and FH-60, terrain structure are very fine highlighted similar to TRI map of fig. 3. The two indices TRI and VRM of the resulted roughness maps showed a loss in terrain heterogeneity and a trend to terrain homogeneity by a high degree of smoothness especially in the last three DSMs FH-120, FH-240, and FH-360. VRM measures the variation in terrain independent of its overall gradient, VRM is able to differentiate among terrain types.

RESULTS

In this work, we have tested two widely used methods: Terrain Roughness Index (TRI), Vector Roughness Measure (VRM), Terrain Roughness Index (TRI) calculates the sum change in elevation between a grid cell and its neighborhood, according to the algorithm by [Valentine et al., 2004].

Table 3. Terrain Ruggedness Index statistical values at each level. Std., standard deviation; Skew. Skewness; n, number of cell in a raster grid

	Mean	Std	Skew.	Kurtosis	n	Min.	Max.	Median	r ²
TRI-20	0.116	0.062	1.202	2.861	40436	0.005	0.544	0.112	0.0014
TRI-40	0.171	0.085	0.702	1.233	18522	0.008	0.591	0.172	0.00006
TRI-60	0.211	0.101	0.602	0.575	8891	0.016	0.636	0.208	0.0059
TRI-120	0.520	0.198	-0.424	-0.045	1901	0.037	1.093	0.552	0.0081
TRI-240	0.822	0.302	-0.385	-0.323	559	0.136	1.695	0.879	0.0033
TRI-360	1.113	0.381	-0.723	-0.448	286	0.152	1.874	1.234	0.0292

The statistics of the TRI values at each flight height listed in table 3, the values of Min., Max., Mean and Std. showed that the TRI values increased with the flight height hence with the scale. From the values of r² it is proven that no homogeneity of TRI values with their neighborhoods in each layer, it is normal especially for the high spatial resolution layer TRI-20, TRI-40, and TRI-60 with high n values.

For TRI-20 no symmetric data distribution because of the high skewness value of 1.202, but the evidence is that negative values for the skewness at TRI-120, TRI-240 and TRI-360 indicate data that are skewed left and positive values for the skewness indicate that high spatial resolutions layer TRI-20, TRI-40, and TRI-60 skewed right.

Table 4. Vector Ruggedness Measure statistical values at each level

	Mean	Std	Skew.	Kurtosis	n	Min.	Max.	Median	r ²
VRM-20	0.021	0.019	2.219	6.906	40436	0	0.166	0.017	0.013
VRM-40	0.021	0.017	1.753	4.757	18522	0	0.130	0.018	0.007
VRM-60	0.015	0.012	1.512	3.137	8891	0.0001	0.080	0.013	0.026
VRM-120	0.019	0.011	0.384	0.563	1901	0.0001	0.063	0.020	0.0001
VRM-240	0.015	0.008	0.119	-0.561	559	0.0006	0.037	0.015	0.0009
VRM-360	0.014	0.006	-0.289	-0.914	286	0.0009	0.027	0.015	0.0081

The distributions of roughness values (VRM) for the five levels were highly skewed to the right with the highest proportion of VRM values at the mean instead of FH-360 values skewed to the left.

Our results showed that TRI and VRM directly measured heterogeneity of terrain more independently of scale, and both indices exhibited a pattern of bias in that the minimum value of roughness increased with increasing spatial resolution.

A correlation analysis provided to understand the similarity between TRI and VRM.

High correlation recorder at all flight heights, the scattered plot of figure 6 shows a high degree of similarity in small values at FH-20, FH-40 and FH-60 expressed in the red elongated areas of figures 6, a, b and c.

At high flight height the concentration of the correlated values is moving from small to mean values with a trend to the right fig. 6, e, otherwise the correlation values of TRI and VRM in figure 6f became more scattered and less dense due to a dilution of similarity resulted from the changing of the spatial resolution (pixel size).

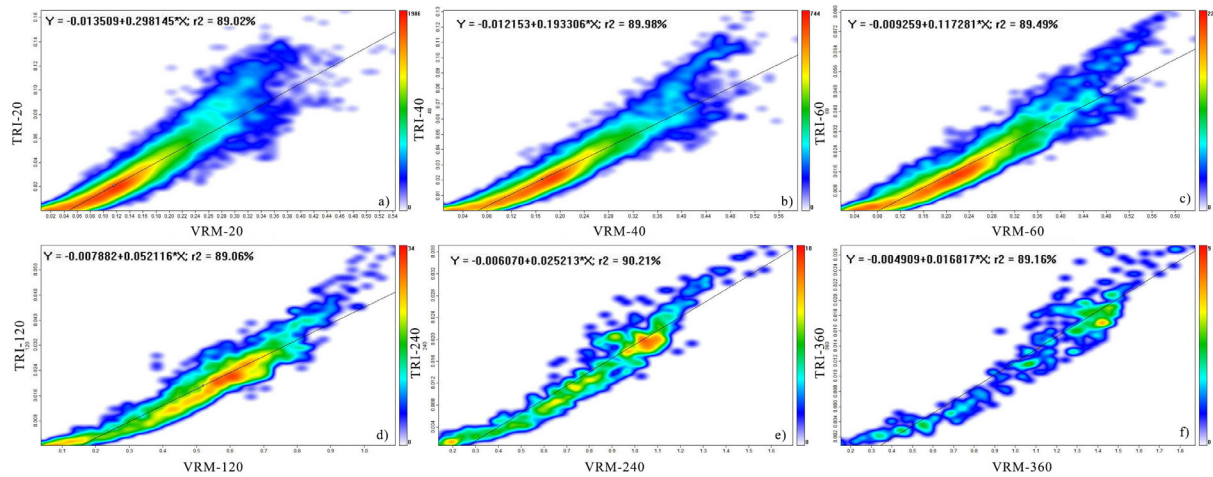


Fig. 6. Scatterplot of TRI and VRM ruggedness values at all levels of details:
a) FH-20, b) FH-40, c) FH-60, d) FH-120, e) FH-240, f) FH-360

We can say from figure 6 that the two roughness indices are very similar and have a high correlation and the degree of terrain roughness vary with the spatial resolution. Differences in the distributions of roughness, measured by VRM, and TRI reflected the characteristic terrain physiography of the terrain.

CONCLUSION

Surface Roughness in Earth sciences is used as an explanatory index. It is dependent upon exogenic and endogenic geographical processes. Many methods for surface Roughness measuring such as: area ratio, vector dispersion, the standard deviation of first and second terrain derivative (elevation, slope, and curvature) have been implemented in GIS and based on digital models.

The possibility of the production of digital models at different spatial resolution spatially UAV based one, allows fast and inexpensive multiscale analysis of surface Roughness. Two applied indices Topographic Roughness Index (TRI) and Vector Roughness Measure (VRM) at different scale level express a variety in terrain heterogeneity at a UAV flight height of 20, 40, 60, 120, 240 and 360.

Both indices show a roughness variation with scales and a transition from coarse to smooth between FH-60 and FH-120, a cartographic generalization influenced by flight height is very clear in figure 4 and 5. Our statistical and correlation analysis of roughness indices prove that multiscale and multilevel UAV flights datasets are: a visual cartographic generalization, a transition scale from level to another, a live roughness monitoring apparatus leads to a detection of fine scale/regional relief, and performance at a variety of scales.

Researchers must be aware of potential biases that originate in DSM at multiscale (different spatial resolution) when TRI and VRM values are interpreted. All DSMs contain inherent

inaccuracies due to the sources errors in original data. The elevation accuracy of a DSM is greatest in flat terrain and decreases in steep terrain where the roughness incises [Koeln et al., 1996]. Terrain roughness is a complicated geomorphometric parameter, it could be calculated in many ways, under many names roughness, micro relief, and others.

REFERENCES

1. *Beasom S. L., Wiggers E. P., Giordono R. J.* A technique for assessing land surface ruggedness. *Journal of Wildlife Management*. 1983. V. 47. P. 1163–1166.
2. *Doumit J. A., Pogorelov A. V.* Multi-scale Analysis of Digital Surface Models Based on UAV Datasets. *Modern Environmental Science and Engineering (ISSN 2333-2581)*, 2017. V. 3, No 7. P. 460–468.
3. *Elliot J. K.* An investigation of the change in surface roughness through time on the foreland of Austre Okstindbreen, North Norway. *Comput. Geosci.* 1989. V. 15, No 2. P. 209–217.
4. *Evans I. S.* General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. *Spatial analysis in geomorphology* / R. J. Chorley, editor. New York: Harper and Row, 1972. P. 17–90.
5. *Grohmann C., Smith M., Riccomini C.* Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland, *IEEE T. Geosci. Remote.* 2011. V. 49. P. 1200–1213.
6. *Herzfeld U. C., Mayer H., Feller W., Mimler M.* Geostatistical analysis of glacier-roughness data. *Ann. Glaciol.* 2000. V. 30, No 1. P. 235–242.
7. *Hobson R. D.* Surface roughness in topography: quantitative approach. *Spatial analysis in geomorphology*. New York: Harper and Row, 1972. P. 221–245.
8. *Koeln G. T., Cowardin L. M., Strong L. L.* *Geographical information systems* / T. A. Bookhout, ed. Research and management techniques for wildlife and habitats. Fifth ed., rev. The Wildlife Society, Bethesda MD. 1996. P. 540–566.
9. *Mark D. M.* Geomorphometric parameters: A review and evaluation, *Geografiska Annaler. Ser. A. Phys. Geography*. 1975. V. 57, No ¾. P. 165–177.
10. *Riley S. J., DeGloria S. D., Elliot R. A.* Terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain journal of sciences*. 1999. V. 5, No 1–4.
11. *Stone R. O., Dugundji J.* A study of micro relief – Its mapping, classification and quantification by means of a Fourier analysis. *Eng. Geol.* 1965. V. 1, No 2. P. 89–187.
12. *Valentine P. C., Scully L. A., Fuller S. J.* Terrain Ruggedness Analysis and Distribution of Boulder Ridges and Bedrock Outcrops in the Stellwagen Bank National Marine Sanctuary Region – Posters presented at the Fifth International Symposium of the Geological and Biological Habitat Mapping Group, 2004, Galway, Ireland.
13. *Veitinger J., Purves R. S., Sovilla B.* Potential slab avalanche release area identification from estimated winter terrain: a multi-scale, fuzzy logic approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016. V. 16. P. 2211–2225.

Флоринский И.В.¹, Филиппов С.В.²

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА: ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА BLENDER

АННОТАЦИЯ

Трехмерное моделирование – один из этапов обработки данных, который особенно важен для последующего адекватного восприятия информации о пространственно распределенных объектах, явлениях и процессах. Трехмерное моделирование рельефа на основе цифровых моделей рельефа (ЦМР) с использованием простых ортографических и перспективных проекций является стандартной процедурой, реализованной во многих коммерческих и открытых геоинформационных системах. Однако при решении серьезных научных задач возможностей стандартного геоинформационного инструментария для трехмерной визуализации бывает недостаточно. В данной статье описана и проиллюстрирована разработанная нами методика создания трехмерных моделей рельефа с использованием бесплатного пакета Blender с открытым исходным кодом (приводится его краткая характеристика). В качестве исходных данных применялась тестовая ЦМР фрагмента центральной части дна Северного Ледовитого океана, выделенная из International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 3.0. Разработанная методика трехмерного моделирования рельефа включает в себя следующие основные этапы: 1) Автоматическое создание полигонального объекта посредством специального Python-скрипта; 2) Выбор кратности вертикального преувеличения масштаба; 3) Выбор метода сглаживания геометрии модели; 4) Выбор количества источников света и их расположения; 5) Выбор материала для поверхности модели и метода интерполяции значений яркости; 6) Наложение тематических слоев (текстур) на трехмерную модель; 7) Рендеринг модели. Разработанная методика будет использована в качестве основы при выполнении проекта по созданию информационно-вычислительной системы морфометрического моделирования рельефа дна Северного Ледовитого океана. Система будет предназначена для информационной поддержки гидрографических, морских геоморфологических, геологических, геофизических и океанологических исследований Арктики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: визуализация, цифровое моделирование рельефа, трехмерное моделирование, компьютерная графика, Python.

¹ Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 142290, Пущино, Московская обл., Россия, *e-mail*: iflor@mail.ru

² Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 142290, Пущино, Московская обл., Россия, *e-mail*: fsv141@mail.ru

Igor V. Florinsky¹, Sergey V. Filippov²

THREE-DIMENSIONAL TERRAIN MODELING: APPLICATION OF THE BLENDER PACKAGE

ABSTRACT

Three-dimensional modeling is one of the data processing steps, which is important for further adequate perception of the information on spatially distributed objects, phenomena, and processes. Three-dimensional terrain modeling based on digital elevation models (DEM) using simple orthographic and perspective projections is a standard procedure implemented in many commercial and open-source geoinformation systems. However, features of standard geoinformation tools may be insufficient for three-dimensional visualization solving major scientific problems. In this article, we describe and illustrate a methodology developed to generate three-dimensional terrain models using the free open-source Blender package (its brief characteristics are presented). As an initial data, we used a testing DEM for a portion of the central part of the Arctic Ocean floor extracted from the International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 3.0. The developed methodology for generation of three-dimensional terrain models includes the following key stages: (1) Automatic creating a polygonal object by means of a special Python script; (2) Selecting a vertical exaggeration scale; (3) Selecting a method for smoothing the geometry of a three-dimensional model; (4) Selecting a number of lighting sources and their location; (5) Selecting a material for the model surface and a shading method; (6) Overlaying thematic textures on the three-dimensional model; (7) Rendering the model. The developed methodology will be used as a basis for the implementation of the project on the creation of an information and computing system for morphometric modeling of the topography of the Arctic Ocean floor. The system will be designed for information support of hydrographic, marine geomorphological, geological, geophysical, and oceanological studies in the Arctic Region.

KEYWORDS: visualization, digital terrain modeling, 3D modeling, computer graphics, Python.

ВВЕДЕНИЕ

Трехмерное моделирование – один из этапов обработки данных, который особенно важен для последующего адекватного восприятия информации о пространственно распределенных объектах, явлениях и процессах. Визуальный просмотр и анализ трехмерных моделей и блок-диаграмм из разных точек пространства может способствовать правильной интерпретации карт, цифровых моделей и данных дистанционного зондирования, а также пониманию взаимосвязей между элементами геосистем.

Существует три основных типа трехмерного моделирования, основанного на использовании цифровых моделей рельефа (ЦМР) [Florinsky, 2016, chap. 8]:

1. Трехмерное моделирование рельефа [Evans, 1972; Peucker, 1980; Eyton, 1986; Patterson, 2001], в котором объектом моделирования является: а) рельеф суши (поверхность раздела сред «литосфера – атмосфера»); б) подводный рельеф (поверхность раздела сред «литосфера – гидросфера»); в) ледяной рельеф (поверхность раздела сред

¹ Institute of Mathematical Problems of Biology, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290, Moscow Region, Russia, *e-mail*: iflor@mail.ru

² Institute of Mathematical Problems of Biology, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290, Moscow Region, Russia, *e-mail*: fsv141@mail.ru

«гляциосфера – атмосфера»); г) подледный рельеф (поверхность раздела сред «гляциосфера – литосфера»); д) рельеф внеземных территорий (поверхность раздела сред «литосфера – космос» или «литосфера – атмосфера», если атмосфера существует); е) рельеф поверхности почвенных горизонтов, стратиграфических горизонтов и геологических структур (контактные поверхности между смежными почвенными горизонтами, стратиграфическими горизонтами и геологическими телами).

Трехмерное моделирование рельефа с использованием простых ортографических и перспективных проекций является стандартной процедурой, которая реализована во многих коммерческих и открытых геоинформационных системах (например, ArcGIS и GRASS), специализированных системах для интерполяции ЦМР (например, Surfer) и в универсальных математических пакетах (например, Matlab и Maple). Существуют также более сложные подходы, в частности, перспективное панорамное трехмерное моделирование [Patterson, 2001; Jenny et al., 2010] и **плановое наклонное картографирование рельефа** [Jenny, Patterson, 2007]. Для построения читаемых и интерпретируемых трехмерных моделей, как правило, используется преувеличение вертикального масштаба (в зависимости от типа рельефа и размера рассматриваемой территории).

2. Наложение на трехмерные модели рельефа тематических данных (например, данных дистанционного зондирования, почвенных и геологических карт) на трехмерные модели рельефа [Eyton, 1986; Ziadat et al., 2003; Palyvos et al., 2006; Qi et al., 2006; Kukowski et al., 2008], а также слоев морфометрических моделей, рассчитанных по ЦМР [Florinsky, 2017]. Этот подход также является стандартной процедурой и реализован во многих ГИС.

3. Трехмерное тематическое (геологическое, почвенное, гляциологическое и пр.) моделирование [Morris, 1991; Pflug, Harbaugh, 1992; McMahon, North, 1993; Breunig, 1996; Pereira, FitzPatrick, 1998; Grunwald et al., 2000; Mendonça Santos et al., 2000; Maerten et al., 2001; Lemon, Jones, 2003; Masumoto et al., 2004; Ramasundaram et al., 2005; Guillaume et al., 2008; Kaufmann, Martin, 2008; Caumon et al., 2009; De Donatis et al., 2009; Delarue et al., 2009; Fernandez et al., 2009; Zanchi et al., 2009; Mateo Lázaro et al., 2014], для которого используются различные комбинации трехмерных моделей рельефа суши, дна океана, геологических, почвенных и гляциологических поверхностей, а также иные данные о пространственных характеристиках различных элементов геосистем.

Хотя многие геоинформационные системы дают возможность проведения трехмерного моделирования по ЦМР, в большинстве случаев пользователь ограничен набором предоставляемых стандартных опций. Вероятно, этого может быть достаточно для трехмерной визуализации результатов выполнения коммерческих, образовательных, административных и других проектов с нулевой или низкой научной компонентой. Для решения серьезных научных задач, примерами которых являются работы, процитированные выше в п. 3, стандартного геоинформационного инструментария трехмерной визуализации бывает недостаточно. Эта проблема решается, в частности, путем использования различных графических пакетов [Hansen, Johnson, 2005; Lipşa et al., 2012; Johnson, Hertig, 2014], например, пакета Blender, который успешно применяется в различных областях науки [Kent, 2015]: биологии [Autin, 2012], астрономии [Kent, 2013], геоинформатике [Scianna, 2013; Florinsky, Filippov, 2015, 2017] и др.

В настоящей работе, на примере фрагмента дна Северного Ледовитого океана, описывается разработанная нами методика создания трехмерных моделей рельефа с использованием пакета Blender.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАКЕТА BLENDER

Blender [<https://www.blender.org>] – программное обеспечение, предназначенное для трехмерного моделирования, визуализации и анимации [Hess, 2010; Blain, 2014]. Его ключевыми достоинствами являются:

1. Бесплатность и открытость исходного кода.
2. Мультиплатформенность (Linux, MS Windows, MacOS).
3. Универсальность: включает в себя трехмерный моделер/аниматор/рендер, нодовый композер и нелинейный видеомонтажер.
4. Наличие графического движка реального времени с уникальной системой «программирования» без необходимости написания программного кода.
5. Поддержка мультипроцессорности и GPU-рендеринга.
6. Активное развитие: новые версии пакета со значительными нововведениями появляются примерно раз в квартал.
7. Компактность и стабильность программного кода.
8. Наличие дополнения Blend4Web [<https://www.blend4web.com>], позволяющего создавать интерактивные Интернет-приложения с фотореалистичной графикой реального времени на основе современного стандарта WebGL, поддерживаемого всеми основными браузерами без плагинов.
9. Возможность произвольного управления всеми функциями Blender, расширения их состава, а также управление пользовательскими данными при помощи языка Python 3.x, интерпретатор которого встроен в пакет и не нуждается в установке. Простой интерпретируемый язык Python фактически уже стал стандартом в научной среде; для него написано огромное количество библиотек.

Благодаря развитому API и обширному набору встроенных средств представления и обработки данных Blender может служить средой для виртуального моделирования практически в любых областях знания.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Представленная в этой статье методика трехмерного моделирования рельефа предназначена для выполнения проекта по созданию системы морфометрического моделирования рельефа дна Северного Ледовитого океана [Florinsky et al., 2018]. В этой связи при разработке этой методики в качестве исходных данных нами применялась тестовая ЦМР фрагмента дна Северного Ледовитого океана (рис. 1), выделенная из модели IBCAO_V3_500m_RR из цифрового архива International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 [<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/arctic.html>].

IBCAO 3.0 отличается от других батиметрических ЦМР, так как составлена с помощью алгоритма, позволяющего создавать модели с комбинированным разрешением, зависящим от плотности данных на конкретном участке. Районы с достаточной плотностью данных, полученных с помощью многолучевого эхолотирования, имеют разрешение 500 м. В районах с низкой изученностью разрешение определяется расстоянием между точками промеров глубин.

IBCAO 3.0 сопровождается информацией об источнике данных и его разрешении. Среди открытых и общедоступных аналогов IBCAO 3.0 является наиболее полной коллекцией батиметрических данных на Северный Ледовитый океан, собранных международным коллективом экспертов, непосредственно участвующих в экспедициях, предусматривающих батиметрические измерения [Jakobsson et al., 2012].

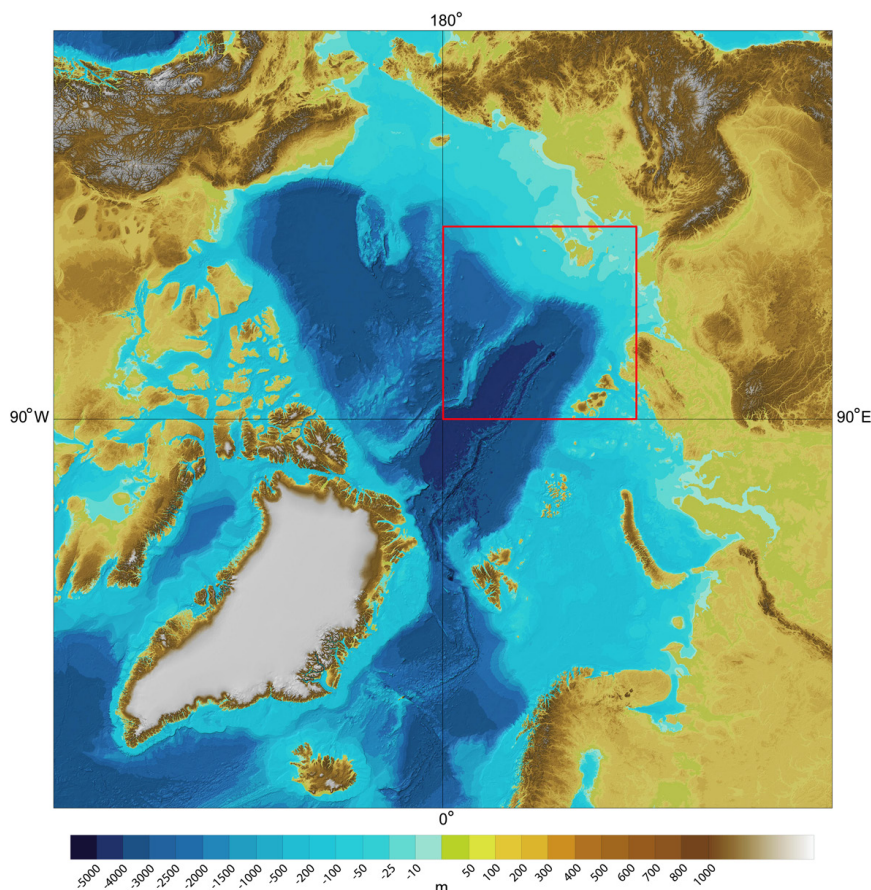


Рис. 1. Карта IBCAO 3.0 [https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/maps/version3_0]. Красной рамкой указано расположение тестовой ЦМР

Fig. 1. IBCAO 3.0 map [https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/maps/version3_0]. The red frame indicates the testing DEM position

Тестовая ЦМР (рис. 1) выделена из IBCAO 3.0 с помощью программы LandLord [Florinsky, 2016]. ЦМР описывает территорию с размерами около 1440×1440 км, в пределах которой расположены восточная часть хребта Ломоносова, юго-восточная часть хребта Гаккеля, юго-восточные фрагменты котловин Макарова, Амундсена и Нансена, часть шельфа и материкового склона моря Лаптевых, часть островов Северная Земля и Новосибирских островов, а также северная оконечность полуострова Таймыр. ЦМР построена в полярной стереографической проекции. Крайняя нижняя строка и крайний левый столбец ЦМР совпадают с меридианами 90° в. д. и 180° в. д., соответственно. Левый нижний угол модели совпадают с Северным полюсом. ЦМР построена на квадратной сетке с шагом 15 км, представляет собой матрицу 97×97 и включает 9409 точек. Значения высот / глубин лежат в диапазоне от 860 м до -5179 м.

МЕТОДИКА ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА

Разработанная методика трехмерного моделирования рельефа в пакете Blender включает в себя следующие основные этапы:

1. Автоматическое создание полигонального объекта посредством специально написанного для этого Python-скрипта;
2. Выбор кратности вертикального преувеличения масштаба;

3. Выбор метода сглаживания геометрии модели;
4. Выбор количества источников освещения и их расположения;
5. Выбор материала для поверхности модели и метода расчета ее освещения (интерполяции значений яркости);
6. Наложение тематических слоев (текстур) на трехмерную модель;
7. Рендеринг модели.

В среде пакета Blender трехмерная модель рельефа является полигональным объектом типа *mesh*. Для того чтобы создать геометрию такого объекта, нужно подготовить списки вершин, ребер и граней объекта. Вершина задается как трехмерный вектор – список или кортеж из трех чисел, соответствующих координатам (x , y , z) в трехмерном пространстве. Массив вершин представляет собой список векторов. Аналогичным образом создаются списки индексов вершин, образующих ребра и грани полигональной решетки. Список, определяющий ребро, содержит два индекса вершин. Список, определяющий грань, может содержать от трех и более индексов вершин.

При работе с тестовой ЦМР нами было выбрано 40-кратное преувеличение вертикального масштаба для усиления визуального восприятия особенностей рельефа. Такой большой коэффициент преувеличения вертикального масштаба связан с тем, что на участке с размерами около 1440 км × 1440 км перепад высот составляет лишь около 6 км.

Геометрия полигональной решетки модели была сглажена с помощью алгоритма подразделения поверхности Кэтмелла–Кларка [Catmull, Clark, 1978] с двукратным разбиением граней. Эффект сглаживания геометрии модели иллюстрирует рис. 2.

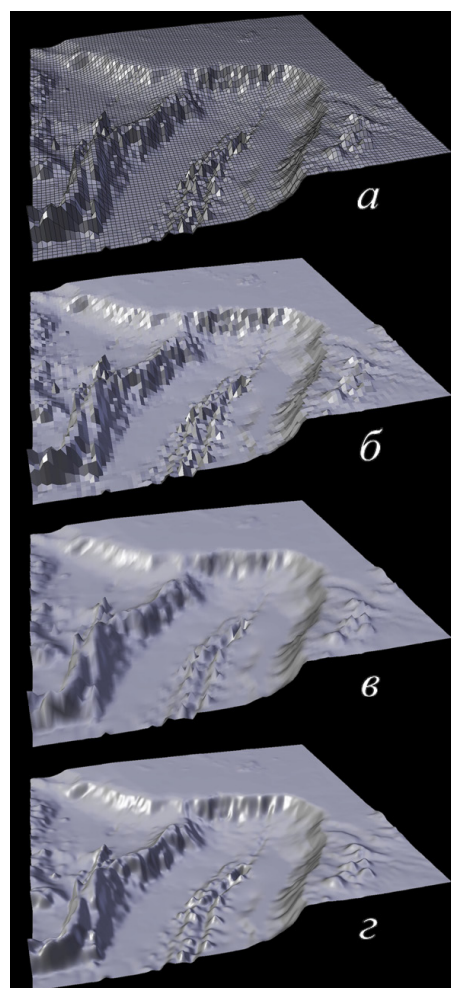


Рис. 2. Сглаживание поверхности:

a – исходная полигональная решетка; *б* – сглаживание отсутствует, «плоская» интерполяция яркости; *в* – сглаживание отсутствует, интерполяция яркости по Фонгу; *г* – сглаживание по методу Кэтмелла–Кларка с двукратным разбиением граней, интерполяция яркости по Фонгу. Иллюстрации сделаны в видовом окне Blender при OpenGL-визуализации в реальном масштабе времени

Fig. 2. Surface smoothing:

a – a source polygon mesh; *б* – an unsmoothed model, the flat shading; *в* – an unsmoothed model, the Phong shading; *г* – the Catmull-Clark smoothing with double subdivision of faces, the Phong shading. Illustrations were produced in the Blender viewport (real-time OpenGL-visualization)

Для освещения модели были использованы три источника света (рис. 3):

1. Источник типа «солнце», расположенный над центром участка в зените. Предназначен для равномерного освещения всей поверхности и подсветки глубоких теней, образуемых другими источниками освещения. Для этого источника света была установлена яркость 0.1. Тени рассчитывались методом трассировки лучей (Ray tracing shadow).

2. Источник типа «прямоугольный прожектор», расположенный за пределами участка и направленный под небольшим углом к горизонтальной плоскости. Предназначен для визуального усиления пластики рельефа. Для этого источника была установлена яркость 1.0. Тени насчитывались с помощью буфера теней Classic-Halfway (один из наименее ресурсоемких методов) и сглаживались с помощью самого быстрого фильтра Vox.

3. Источник точечного типа («точка»), расположенный над котловиной и предназначенный для ее подсветки. Для этого источника была установлена яркость 0.7 с обратно квадратичным затуханием. Тени рассчитывались методом трассировки лучей.

Результат применения отдельно взятых источников света и их различных комбинаций представлен на рис. 4.

Для поверхности модели был выбран стандартный безбликовый материал. Для интерполяции значений яркости при рендеринге в реальном масштабе времени использована модель Фонга [Phong, 1975] (рис. 2). Для интерполяции значений яркости при финальной визуализации (рис. 5 и 6) использовалась ламбертова модель диффузного отражения без расчета бликов [Horn, 1981].

Для примера проецирования тематической текстуры на поверхность моделируемого рельефа была использована батиметрическая карта (рис. 5), полученная по тестовой ЦМР в программе LandLord [Florinsky, 2016]. Скриншоты трехмерной модели с наложенной текстурой представлены на рис. 6. Финальная трехмерная модель может рассматриваться пользователем в любом ракурсе.

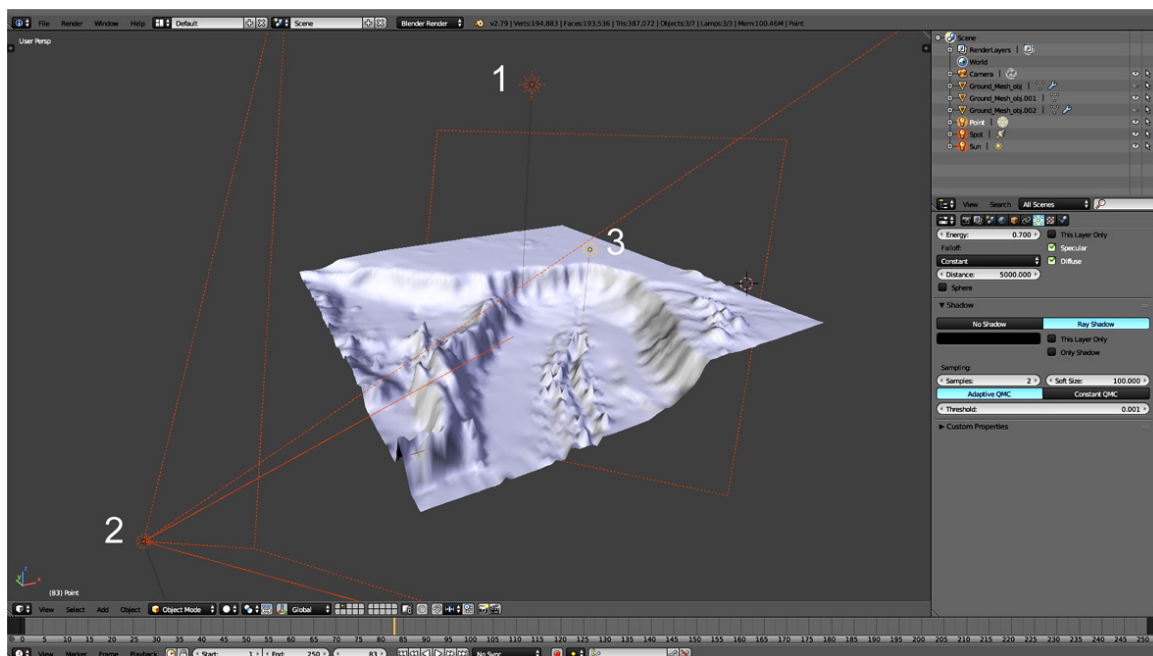


Рис. 3. Источники света:

1 – «солнце»; 2 – «прямоугольный прожектор»; 3 – «точка»

Fig. 3. Light sources:

1 – "sun"; 2 – "spot"; 3 – "point"

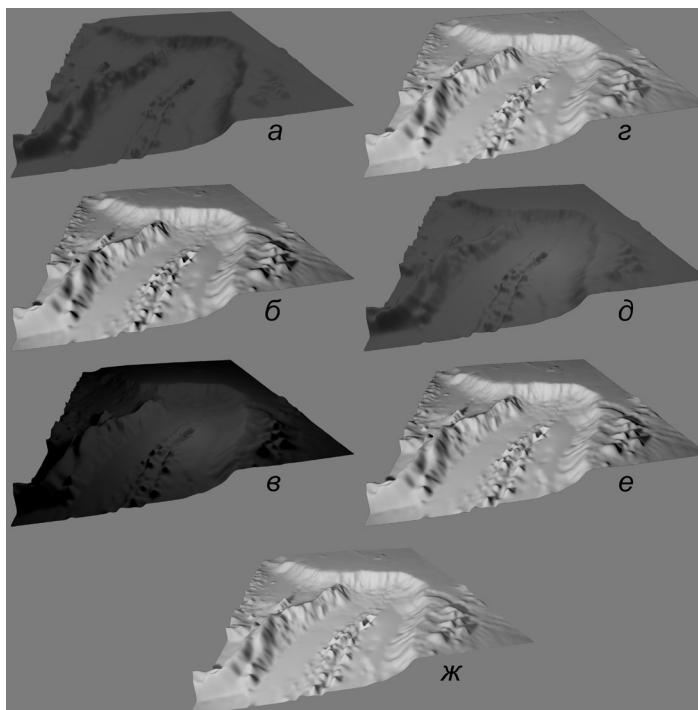


Рис. 4. Применение отдельно взятых источников света и их различных комбинаций:

а – «солнце»; б – «прямоугольный прожектор»; в – «точка»; г – «прямоугольный прожектор» и «солнце»; д – «солнце» и «точка»; е – «прямоугольный прожектор» и «точка»; ж – все три источника света. Иллюстрации сделаны во время финальной визуализации сцены встроенным движком рендеринга Blender Render (не в реальном масштабе времени)

Fig. 4. Application of individual light sources and their combinations:

а – "sun"; б – "spot"; в – "point"; г – "spot" and "sun"; д – "sun" and "point"; е – "spot" and "point"; ж – all three light sources. Illustrations were produced in the final, non-real time visualization of the scene by the legacy rendering engine Blender Render

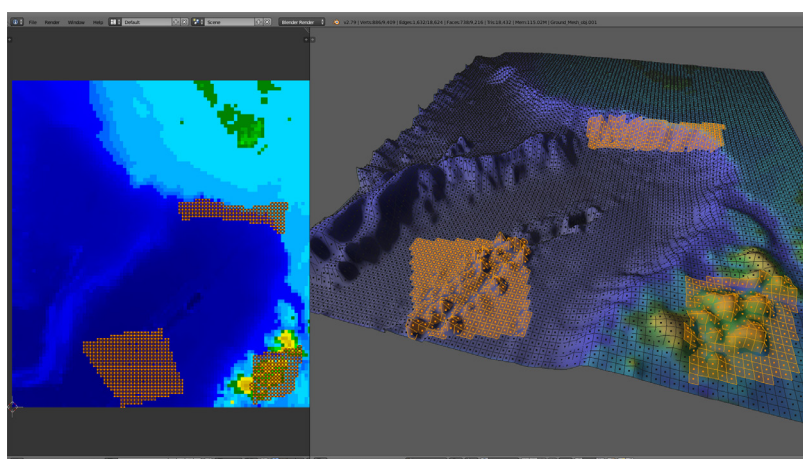


Рис. 5. Проецирование батиметрической текстуры (слева) на поверхность моделируемого рельефа (справа). В трех

местах показана подстилающая сглаженная полигональная решетка

Fig. 5. Overlaying of the bathymetric texture (left) on the three-dimensional model (right). One can see the underlying, smoothed polygonal grid in three locations

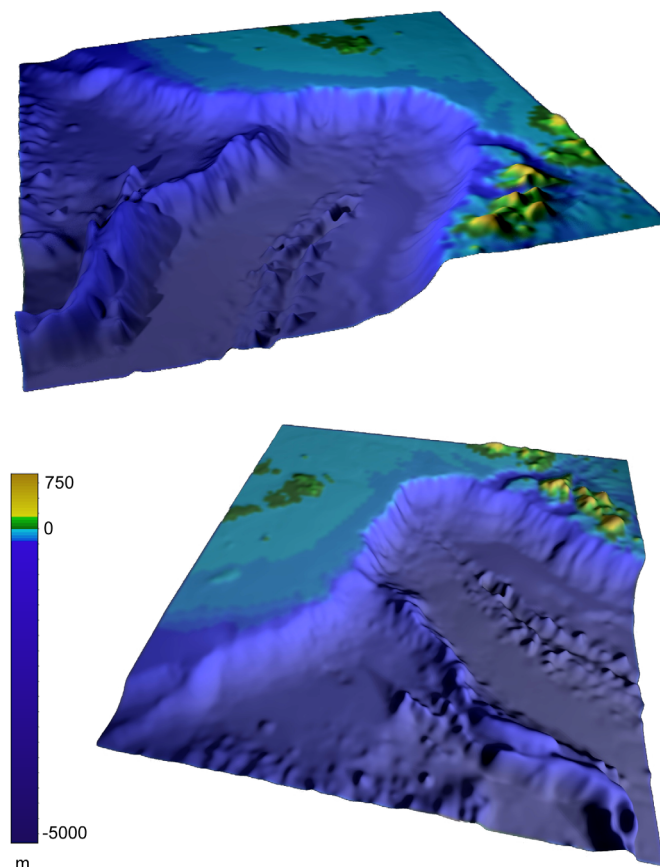


Рис. 6. Примеры скриншотов созданной трехмерной модели
Иллюстрации сделаны во время финальной визуализации сцены встроенным
движком рендеринга Blender Render (не в реальном масштабе времени)
Fig. 6. Screenshot examples for the generated three-dimensional model
Illustrations were produced in the final, non-real time visualization
of the scene by the legacy rendering engine Blender Render

ВЫВОДЫ

Разработана методика создания трехмерных моделей рельефа в среде бесплатного пакета Blender с открытым исходным кодом при помощи встроенного в данный пакет языка Python и Blender API. Методика будет использована в качестве основы при выполнении проекта по созданию информационно-вычислительной системы морфометрического моделирования рельефа дна Северного Ледовитого океана. Эта система должна обеспечить хранение большой ЦМР дна океана, интерактивную многомасштабную трехмерную визуализацию морфометрических моделей и свободный доступ к этой информации через Интернет, с возможностью трехмерной визуализации в реальном масштабе времени в режиме онлайн. Система будет предназначена для информационной поддержки гидрографических, морских геоморфологических, геологических, геофизических и океанологических исследований Арктики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 18-07-00223.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 18-07-00223.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Autin L., Johnson G., Hake J. et al.* uPy: a ubiquitous CG Python API with biological-modeling applications. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2012. V. 32, No 5. P. 50–61. DOI: 10.1109/MCG.2012.93.
2. *Blain J.M.* The complete guide to Blender graphics: computer modeling and animation. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2014. 575 p.
3. *Breunig M.* Integration of spatial information for geo-information. Berlin: Springer, 1996. 171 p.
4. *Catmull E., Clark J.* Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer-Aided Design*. 1978. V. 10, No 6. P. 350–355. DOI: 10.1016/0010-4485(78)90110-0.
5. *Caumon G., Collon-Drouaillet P., Le Carlier de Veslud C. et al.* Surface-based 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*. 2009. V. 41, No 8. P. 927–945. DOI: 10.1007/s11004-009-9244-2.
6. *De Donatis M., Borraccini F., Susini S.* Sheet 280–Fossombrone 3D: a study project for a new geological map of Italy in three dimensions. *Computers and Geosciences*. 2009. V. 35, No 1. P. 19–32. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.09.004.
7. *Delarue F., Cornu S., Daroussin J. et al.* 3D representation of soil distribution: an approach for understanding pedogenesis. *Comptes Rendus Geoscience*. 2009. V. 341, No 6. P. 486–494. DOI: 10.1016/j.crte.2009.04.004.
8. *Evans I.S.* General geomorphometry, derivations of altitude, and descriptive statistics. *Spatial analysis in geomorphology*. London: Methuen, 1972. P. 17–90.
9. *Eyton J.R.* Digital elevation model perspective plot overlays. *Annals of the Association of American Geographers*. 1986. V. 76, No 4. P. 570–576. DOI: 10.1111/j.1467-8306.1986.tb00137.x.
10. *Fernandez O., Jones S., Armstrong N. et al.* Automated tools within workflows for 3D structural construction from surface and subsurface data. *GeoInformatica*. 2009. V. 13, No 3. P. 291–304. DOI: 10.1007/s10707-008-0059-y.
11. *Florinsky I.V.* Digital terrain analysis in soil science and geology. 2nd edition. Amsterdam: Academic Press, 2016. 486 p.
12. *Florinsky I.V., Filippov S.V.* Development of virtual morphometric globes using Blender. arXiv: 1512.08511 [physics.geo-ph], 2015. 14 p.
13. *Florinsky I.V., Filippov S.V.* A desktop system of virtual morphometric globes for Mars and the Moon. *Planetary and Space Science*. 2017. V. 137. P. 32–39. DOI: 10.1016/j.pss.2017.01.005.
14. *Florinsky I.V., Filippov S.V., Abramova A.S. et al.* Towards geomorphometric modelling of the topography of the Arctic Ocean floor. *Proceedings of the 7th International conference on cartography & GIS*, 18–23 June 2018, Sozopol, Bulgaria. Sofia: Bulgarian Cartographic Association, 2018 (in press).
15. *Grunwald S., Barak P., McSweeney K., Lowery B.* Soil landscape models at different scales portrayed in Virtual Reality Modeling Language. *Soil Science*. 2000. V. 165, No 8. P. 598–615.
16. *Guillaume B., Dhont D., Brusset S.* Three-dimensional geologic imaging and tectonic control on stratigraphic architecture: upper Cretaceous of the Tremp Basin (south-central Pyrenees, Spain). *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 2008. V. 92, No 2. P. 249–269. DOI: 10.1306/10110706089.
17. *Hansen C.D., Johnson C.R. (Eds.)* The visualization handbook. Amsterdam: Academic Press, 2005. 962 p.
18. *Hess R.* Blender foundations: the essential guide to learning Blender 2.6. Amsterdam: Focal Press, 2010. 404 p.

19. *Horn B.K.P.* Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*. 1981. V. 69, No 1. P. 14–47.
20. *Jakobsson M., Mayer L., Coakley B. et al.* The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0. *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39, No 12. L12609. DOI: 10.1029/2012GL052219.
21. *Jenny B., Patterson T.* Introducing plan oblique relief. *Cartographic Perspectives*. 2007. No 57. P. 21–40, 88–90. DOI: 10.14714/CP57.279.
22. *Jenny H., Jenny B., Hurni L.* Interactive design of 3D maps with progressive projection. *Cartographic Journal*. 2010. V. 47, No 3. P. 211–221. DOI: 10.1179/000870410X12786821061495.
23. *Johnson G.T., Hertig S.* A guide to the visual analysis and communication of biomolecular structural data. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2014. V. 15, No 10. P. 690–698. DOI: 10.1038/nrm3874.
24. *Kaufmann O., Martin T.* 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers and Geosciences*. 2008. V. 34, No 3. P. 278–290. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.09.005.
25. *Kent B.R.* 3D scientific visualization with Blender®. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2015. 105 p.
26. *Kent B.R.* Visualizing astronomical data with Blender. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2013. V. 125, No 928. P. 731–748. DOI: 10.1086/671412.
27. *Kukowski N., Hampel A., Hoth S., Bialas J.* Morphotectonic and morphometric analysis of the Nazca plate and the adjacent offshore Peruvian continental slope – implications for submarine landscape evolution. *Marine Geology*. 2008. V. 254, No 1–2. P. 107–120. DOI: 10.1016/j.margeo.2008.05.017.
28. *Lemon A.M., Jones N.L.* Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. *Computers and Geosciences*. 2003. V. 29, No 5. P. 547–555. DOI: 10.1016/S0098-3004(03)00051-7.
29. *Lipša D.R., Laramée R.S., Cox S.J. et al.* Visualization for the physical sciences. *Computer Graphics Forum*. 2012. V. 31, No 8. P. 2317–2347. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2012.03184.x.
30. *Maerten L., Pollard D.D., Maerten F.* Digital mapping of three-dimensional structures of the Chimney Rock fault system, central Utah. *Journal of Structural Geology*. 2001. V. 23, No 4. P. 585–592. DOI: 10.1016/S0191-8141(00)00142-5.
31. *Masumoto S., Raghavan V., Yonezawa G. et al.* Construction and visualization of a three dimensional geologic model using GRASS GIS. *Transactions in GIS*. 2004. V. 8, No 2. P. 211–223. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2004.00176.x.
32. *Mateo Lázaro J., Sánchez Navarro J.Á., García Gil A., Edo Romero V.* 3D-geological structures with digital elevation models using GPU programming. *Computers and Geosciences*. 2014. V. 70. P. 138–146. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.05.014.
33. *McMahon M.J., North C.P.* Three-dimensional integration of remotely sensed geological data: a methodology for petroleum exploration. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1993. V. 59, No 8. P. 1251–1256.
34. *Mendonça Santos M.L., Guenat C., Bouzelboudjen M., Golay F.* Three-dimensional GIS cartography applied to the study of the spatial variation of soil horizons in a Swiss floodplain. *Geoderma*. 2000. V. 97, No 3–4. P. 351–366. DOI: 10.1016/S0016-7061(00)00045-8.
35. *Morris K.* Using knowledge-base rules to map the three-dimensional nature of geological features. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1991. V. 57, No 9. P. 1209–1216.

36. *Palyvos N., Bantekas I., Kranis H.* Transverse fault zones of subtle geomorphic signature in northern Evia Island (central Greece extensional province): an introduction to the Quaternary Nileas graben. *Geomorphology*. 2006. V. 76, No 3–4. P. 363–374. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.12.002.
37. *Patterson T.* DEM manipulation and 3-D terrain visualization: techniques used by the U.S. National Park Service. *Cartographica*. 2001. V. 38, No 1–2. P. 89–101. DOI: 10.3138/8741-G618-5601-1125.
38. *Pereira V., FitzPatrick E.A.* Three-dimensional representation of tubular horizons in sandy soils. *Geoderma*. 1998. V. 81, No 3–4. P. 295–303. DOI: 10.1016/S0016-7061(97)00069-4.
39. *Peucker T.K.* The use of computer graphics for displaying data in three dimensions. *Cartographica*. 1980. V. 17, No 2. P. 59–72. DOI: 10.3138/E230-6J01-2741-122J.
40. *Pflug R., Harbaugh J.W. (Eds.)* Computer graphics in geology. Berlin: Springer, 1992. 298 p.
41. *Phong B.T.* Illumination for computer generated pictures. *Communications of ACM*. 1975. V. 18, No 6. P. 311–317. DOI: 10.1145/360825.360839.
42. *Qi F., Zhu A., Harrower M., Burt J.E.* Fuzzy soil mapping based on prototype category theory. *Geoderma*. 2006. V. 136, No 3–4. P. 774–787. DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.06.001.
43. *Ramasundaram V., Grunwald S., Mangeot A. et al.* Development of an environmental virtual field laboratory. *Computers and Education*. 2005. V. 45, No 1. P. 21–34. DOI: 10.1016/j.compedu.2004.03.002.
44. *Scianna A.* Building 3D GIS data models using open source software. *Applied Geomatics*. 2013. V. 5, No 2. P. 119–132. DOI: 10.1007/s12518-013-0099-3.
45. *Zanchi A., Francesca S., Stefano Z. et al.* 3D reconstruction of complex geological bodies: examples from the Alps. *Computers and Geosciences*. 2009. V. 35, No 1. P. 49–69. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.09.003.
46. *Ziadat F.M., Taylor J.C., Brewer T.R.* Merging Landsat TM imagery with topographic data to aid soil mapping in the Badia region of Jordan. *Journal of Arid Environments*. 2003. V. 54, No 3. P. 527–541. DOI: 10.1006/jare.2002.1076.

Ахметова Г.В.¹, Бахмет О.Н.², Новиков Г.С.³, Медведева М.В.⁴, Солодовников А.Н.⁵

**РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
«ПОЧВЫ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ»:
ФОРМИРОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ И СТРУКТУРЫ**

АННОТАЦИЯ

В настоящее время на основе обширного, полученного более чем за 60 лет исследований материала о почвах и почвенном покрове Республики Карелия созданы многочисленные карты. Составлены базовые почвенные карты различного масштаба как на весь регион, так и на отдельные территории, построены тематические картосхемы физико-химических свойств почв и содержания в них макро- и микроэлементов. В связи с этим для наиболее эффективного использования в научных и практических целях собранная картографическая информация требует систематизации и представления под единой оболочкой. Наиболее перспективным является использование современных технологий и создание геоинформационной системы (ГИС) «Почвы Республики Карелия».

Основой для формирования ГИС являются переведенные в векторный формат архивные карты: Почвенная карта Карелии (масштаб 1 : 500 000, 1955 г.) и листы Государственной Почвенной Карты на территорию Карелии (масштаб 1 : 1 000 000, 1962 г.).

В представленной работе обсуждается концепция и обозначены этапы формирования ГИС «Почвы Республики Карелия». Разработана ее структура, которая состоит из разделов: «Карты природных условий», «Общие почвенные карты», «Тематические почвенные карты», «Материалы почвенных исследований». Таким образом, в состав формирующейся ГИС будут входить векторные, растровые материалы и исходные табличные данные.

Предложенные принципы позволят организовать работу по наполнению ГИС как архивными материалами почвенного наследия, так и данными современных исследований. Данная ГИС предназначена для реализации научных и прикладных задач, обеспечивая базу для организации природно-экологического мониторинга, а также может быть использована различными органами власти, образовательными учреждениями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационные технологии, база данных, почвенный фонд Карелии, почвенные карты.

¹ Институт леса КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: akhmetova@krc.karelia.ru

² Институт леса КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: obahmet@mail.ru

³ Институт леса КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: novikovsergey.nsg@gmail.com

⁴ Институт леса КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: mariamed@mail.ru

⁵ Институт леса КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: solod@krc.karelia.ru

**Gulnara V. Akhmetova¹, Olga N. Bakhmet², Sergey G. Novikov³, Maria V. Medvedeva⁴,
Anton N. Solodovnikov⁵**

**DEVELOPMENT OF THE GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM
"SOILS OF THE REPUBLIC OF KARELIA":
DESIGNING THE CONCEPT AND THE STRUCTURE**

ABSTRACT

Numerous maps have been created using the vast material about soils and the soil cover of the Republic of Karelia gathered over more than 60 years of studies. Basic soil maps of various scales have been made both for the entire region and for its parts, thematic schematic maps of the physicochemical properties of soils and the content of macro- and microelements in them were drawn. For this cartographic information to be used for scientific and practical purposes as efficiently as possible, it should be systematized and presented through an integrated interface. The most promising approach is to use modern technology and create the geographical information system (GIS) "Soils of the Republic of Karelia".

The basis for this GIS are the archival maps converted into vector format: The Soil Map of Karelia (1 : 500 000 scale, 1955) and sheets of the State Soil Map for the territory of Karelia (1 : 1 000 000 scale, 1962).

This paper discusses the concept and outlines the stages of constructing the GIS "Soils of the Republic of Karelia". Its structure has been worked out and includes the sections "Maps of natural conditions", "General soil maps", "Thematic soil maps", "Materials of soil studies". Thus, the GIS to be created will include vector and raster materials and primary tabular data.

Owing to the suggested principles, the work to fill the GIS with both archival materials on soil heritage and recent research data can be organized. This GIS is designed to support both purely scientific and applied tasks, providing the basis for environmental monitoring, and can be used by various authorities and educational institutions.

KEYWORDS: geoinformational technologies, database, soils of Karelia, soil maps.

ВВЕДЕНИЕ

Карты являются квинтэссенцией существующих на момент создания знаний об объекте. Составление почвенных карт является важным направлением изучения генезиса, разнообразия почв и географических закономерностей их распределения [Национальный атлас почв..., 2011; Hartemink et al., 2013; Minasny, McBratney, 2015]. В последние десятилетия в практику научных исследований активно внедряются новые ГИС-технологии, которые позволяют упорядочить, хранить и обрабатывать картографическую информацию [Digital soil mapping..., 2006; Comprehensive..., 2017]. Накопленный материал в виде бумажных карт может утратить свое значение из-за ветхого состояния и ограниченной возможности исполь-

¹ Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia, *e-mail*: akhmetova@krc.karelia.ru

² Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia, *e-mail*: obahmet@mail.ru

³ Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia, *e-mail*: novikovsergey.nsg@gmail.com

⁴ Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia, *e-mail*: mariamed@mail.ru

⁵ Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia, *e-mail*: solod@krc.karelia.ru

зования, поэтому сейчас очень актуальна проблема перевода картографических источников в цифровой вариант [Цифровая почвенная картография..., 2012]. Возможности использования цифровых почвенных карт очень широки, они позволяют использовать геоинформационные методы для осуществления пространственного анализа почвенного покрова исследуемой территории, а также создавать и визуализировать карты по каждому параметру атрибутивной базы данных [Мешалкина, 2012; Grunwald et al., 2011].

В настоящее время на основе обширного, полученного более чем за 60 лет исследований материала о почвах и почвенном покрове Республики Карелия (РК) созданы многочисленные карты [Картография Карелии, 2014а, б]. Составлены базовые почвенные карты различного масштаба как на весь регион [Почвенная карта Карелии, 1955; Государственная почвенная карта..., 1962; Марченко, 1962], так и на отдельные территории [Морозова, 2002], построены тематические картосхемы физико-химических свойств почв и содержания в них макро- и микроэлементов [Федорец и др., 2008]. В связи с этим для наиболее эффективного использования в научных и практических целях собранная картографическая информация требует систематизации и представления под единой оболочкой. Наиболее перспективным является использование современных технологий и создание геоинформационной системы (ГИС) «Почвы Республики Карелия», которая бы объединила имеющуюся картографическую информацию о почвах Республики Карелия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для формирования основы ГИС «Почвы Республики Карелия» будут использованы следующие материалы, в том числе переведенные в векторный формат архивные карты:

1. Листы Государственной Почвенной Карты на отдельные участки территории Карелии (М. 1 : 1 000 000, 1962 г.). В 2001 г. был подготовлен векторный вариант данной карты. Топ основой являлась векторная электронная карта Республики Карелия «Аэрогеодезия» 1995 г. М. 1 : 1 000 000. Векторизация проводилась в ручном режиме с помощью программного продукта MapInfo Professional 8.5. Всего было оцифровано 3366 полигонов, отражающих элементы почвенного покрова Республики Карелия.

2. Почвенная карта М. 1 : 500 000, составитель О.Н. Михайловская, 1955 г. Данная карта является самой подробной почвенной картой региона на данный момент. Векторизация карты также проводилась в ручном режиме с помощью программного продукта MapInfo Professional 8.5 на основе векторной электронной карты Республики Карелия «Аэрогеодезия» 1995 г. М. 1 : 1 000 000. Были оцифрованы все полигоны (в общем количестве 19 345), отражающие элементы почвенного покрова Республики Карелии [Ахметова, Бахмет, 2013]. В настоящее время проведены работы по актуализации данных, имеющихся на данной карте: актуализированы береговые линии гидрографических объектов, проведена работа по идентификации болотных торфяных почв.

3. Векторный вариант карты плодородия почв Карелии, М. 1 : 500 000, составитель Р.М. Морозова.

4. Средне- и крупномасштабные почвенные картосхемы на отдельные территории региона, в том числе ООПТ, в растровом варианте, зарегистрированные в системе координат.

5. Базы данных по почвам Карелии и множество почвенных описаний с фотографиями почвенных разрезов и табличными данными об их свойствах.

В качестве основы для создания ГИС Почвы Карелии планируется использовать программный продукт MapInfo Professional, который обеспечивает ввод, сохранение, обработку информации и вывод ее на экран, в нем возможно представление как картографической, так и атрибутивной информации. При этом есть возможность соединения с други-

ми программными продуктами (Microsoft Office), в которых хранится информация. Таким образом, в состав формирующейся ГИС «Почвы Республики Карелия» будут входить векторные и растровые данные и непространственные таблицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Работа по формированию ГИС «Почвы Карелии» состоит из нескольких этапов:

1. Разработка структуры базы данных, выявление необходимых элементов – карт и материалов, которые будут входить в будущую ГИС.

На основе имеющихся материалов была разработана структура ГИС, которая в настоящее время состоит из следующих разделов: «Карты природных условий», «Базовые почвенные карты», «Тематические почвенные карты», «Материалы почвенных исследований». Список включенных карт в данные разделы не окончательный, в настоящее время он уточняется и дополняется.

Почва является продуктом деятельности различных природных и антропогенных факторов, в связи с чем прежде чем изучать почву, необходимо знать факторы почвообразования, т. е. природные условия региона. Раздел «КАРТЫ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ» включает в себя серию карт, характеризующих почвообразующие факторы, которые отвечают за формирование почв и почвенного покрова [Miller, Schaetzl, 2014]. Этот раздел для удобства использования, в свою очередь, состоит из нескольких подразделов, посвященных различным видам природных условий (рис. 1).

В качестве исходных материалов будут использованы ранее созданные атласы региона [Атлас Карельской АССР, 1989; Электронный..., 2015], топографические карты [Республика Карелия: атлас, 2001].



Рис. 1. Схема раздела «Карты природных условий»
Fig. 1. Design of section "Maps of nature condition"

Следующие разделы состоят собственно из почвенных карт и материалов почвенных исследований.

Раздел «БАЗОВЫЕ ПОЧВЕННЫЕ КАРТЫ» объединяет разномасштабные карты как на всю территорию РК, так и на отдельные ее районы, на которых изображено географическое распространение почв на различном классификационном уровне (типы, подтипы и т. п.). В данной категории имеющиеся карты были распределены на несколько

подразделов (рис. 2). Решено выделить отдельно подраздел «"Старые" почвенные карты», в него войдут материалы, составленные до середины XX в. [Почвы Карельской АССР, 1937]. Несмотря на то что данные карты являются схематичными и информация на них устарела, они являются источником сведений об истории проведения почвенных исследований, а также могут дать дополнительные данные при проведении почвенных исследований. Особый интерес представляют составленные почвенные картосхемы особо охраняемых природных территорий (ООПТ) РК, так как они позволяют организовать сохранность как эталонных, так и редких почв [Почвы ООПТ Карелии, 2009].



Рис. 2. Схема раздела «Базовые почвенные карты»
Fig. 2. Design of section "Base soil maps"

На контурной основе базовых почвенных карт в настоящее время составлено множество тематических карт: это и картосхемы, которые отражают один показатель (физико-химические свойства, содержания различных химических элементов), и специальные интегральные карты, дающие синтетическую характеристику свойствам почв (карты плодородия и бонитировки почв, биологической активности, почвенно-мелиоративные и т. п.). Данные материалы решено выделить в отдельный раздел – «ТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОЧВЕННЫЕ КАРТЫ» (рис. 3). Большинство картосхем химических свойств были изначально сформированы в программе MapInfo, таким образом, они не требуют специальной подготовки для включения в ГИС.

Отдельный раздел «МАТЕРИАЛЫ ПОЧВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ» (рис. 4) выделен для объединения информации, накопленной сотрудниками лаборатории лесного почвоведения Института леса КарНЦ РАН, и материалов в существующих базах данных по почвам и их свойствам с координатными привязками. Это позволит соединить эту информацию с формирующейся ГИС, и в дальнейшем возможно их дополнение и корректировка.

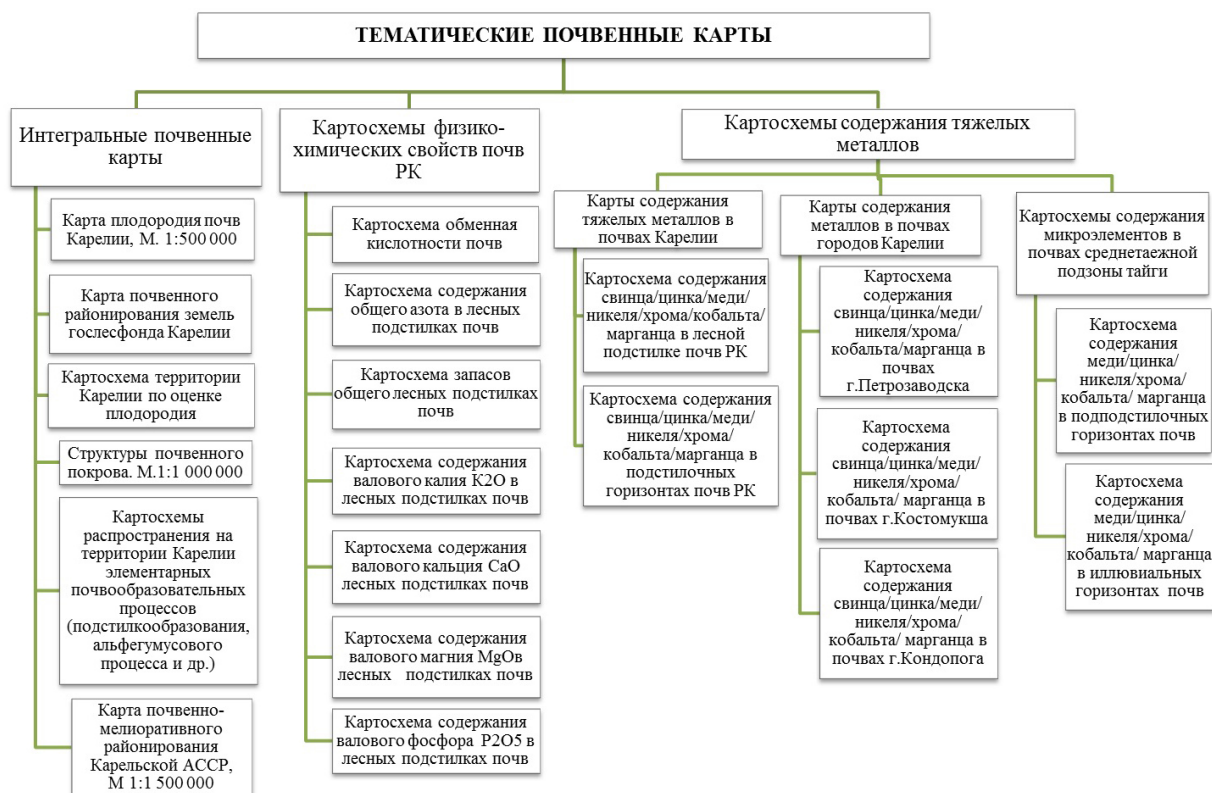


Рис. 3. Схема раздела «Тематические почвенные карты»

Fig. 3. Design of section "Thematic soil maps"



Рис. 4. Схема раздела «Материалы почвенных исследований»

Fig. 4. Design of section "Materials of soil survey"

2. Следующий важный этап формирования ГИС – сканирование и регистрация в системе координат бумажных карт на единой картографической основе (это касается тех карт, с которыми данные манипуляции еще не были проведены). Необходимо единообразное проведение данных работ: использование единой основы – векторная электронная карта Республики Карелия «Аэрогеодезия» 1995 г. М. 1 : 1 000 000; отсканированные материалы должны быть зарегистрированы в системе координат в поперечно-цилиндрической проекции Гаусса-Крюгера, зона 6 (Пулково 1942).

3. Также необходимы работы по приведению атрибутивной информации карт к единообразию. Работы по векторизации базовых почвенных карт были проведены в различное время и разными рабочими коллективами, поэтому таблицы атрибутивной

ких данных были сформированы не на единой основе и включали в себя различные поля и коды. В связи с этим необходимо изменить или перестроить имеющиеся таблицы, чтобы каждый контур имел, по крайней мере, следующие параметры (имя поля и «тип данных»):

- ID «целое»
- наименование почвы «символьное (200)»
- код наименования почвы «целое»
- индекс наименования почвы «символьное (5)»
- гранулометрический состав «символьное (200)»
- код гранулометрический состав «целое»
- наименование комплексов почв «символьное (200)»
- код комплексов почв «символьное (5)»
- занимаемая площадь, км² «вещественные»

ВЫВОДЫ

Создание ГИС «Почвы Карелия» является важным этапом в истории изучения почв региона. Она позволит объединить, систематизировать, дополнять накопленную информацию о почвах Карелии и представить ее в современном и востребованном виде.

Разработанные методы и принципы формирования данной ГИС позволят организовать работу по наполнению ее как архивными материалами почвенного наследия, так и данными современных обследований. Сформирована структура ГИС, состоящая из нескольких разделов, систематизированные картографические источники отражают общую информацию о регионе исследования и содержат общие и специальные данные о почвенном фонде Карелии.

Формирующаяся ГИС предназначена для реализации научных и прикладных задач, проведения научных исследований, а также может быть использована различными органами власти, образовательными учреждениями.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования осуществлялись при финансировании из федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-44-100445).

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out under state order to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (project No 0221-2015-0005) and supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant No 16-44-100445.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Карельской АССР. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1989. 40 с.
2. Ахметова Г.В., Бахмет О.Н. Цифровая версия почвенной карты Карелии масштаба 1 : 500 000 // Разнообразие лесных почв и биоразнообразие лесов: Сб. материалов 5-й Всерос. науч. конф. по лесному почвоведению с междунар. участием. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2013. С. 27–29.
3. Государственная почвенная карта СССР, листы Кировск, Петрозаводск, Олонец, М 1 : 1 000 000, 1962 г. (архив лаборатории лесного почвоведения ИЛ КарНЦ РАН).
4. Картография Карелии. Ч. 1: Атласы и карты. Петрозаводск, 2014. 77 с.

5. Картография Карелии. Ч. 2: Карты из книг. Библиографический указатель литературы. Петрозаводск, 2014. 665 с.
6. *Марченко А.И.* Почвы Карелии. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 310 с.
7. *Мешалкина Ю.Л.* Что такое «Цифровая почвенная картография» // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2012. С. 9–18.
8. *Морозова Р.М.* Почвы и почвенный покров Валаамского архипелага. Петрозаводск: КарНИЦ РАН, 2002. 169 с.
9. Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель, 2011. 632 с.
10. Почвенная карта Карелии, М. 1 : 500 000 / Сост. О.Н. Михайловская. 1955 г. (архив лаборатории лесного почвоведения ИЛ КарНИЦ РАН).
11. Почвенная карта Карелии. М. 1 : 1 000 000 / Сост. Р.М. Морозова. 1996 г. (архив лаборатории лесного почвоведения ИЛ КарНИЦ РАН).
12. Почвы Карельской АССР. Т. 1: Южная Карелия. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1937. 104 с.
13. Республика Карелия: Атлас / Ред.: С. Ерохин, Е. Москвитин. СПб., 2001. 136 с.
14. *Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Морозова Р.М., Солодовников А.Н.* Почвы и почвенный покров особо охраняемых природных территорий Карелии. Петрозаводск: КарНИЦ РАН, 2009. 109 с.
15. *Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Солодовников А.Н., Морозов А.К.* Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.
16. *Филатов Н.Н.* Опыт информационного обеспечения регионов севера РФ о состоянии и изменениях водных объектов и водосборов под влиянием климатических и антропогенных факторов // ИнтерКарто/ИнтерГИС 23. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата: Материалы Междунар. конф. Т. 1. М.: МГУ, 2017. С. 130–140. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-130-142.
17. Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: Сб. ст. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2012. 357 с.
18. Электронный географический атлас Карелии. Петрозаводск, 2015. CD.
19. Comprehensive Geographic Information Systems. Elsevier, 2017. 1474 p.
20. Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective / Eds.: P. Lagacherie, A.B. McBratney, M. Voltz. Developments. Amsterdam: Elsevier, 2006. 600 p.
21. *Grunwald S., Thompson J.A., Boettinger J.L.* Digital soil mapping and modeling at continental scales: finding solutions for global issues // SSSAJ. 2011. V. 75, No 4. P. 1201–1213. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2011.0025>
22. *Hartemink A. E., Krasilnikov P., Bockheim J.G.* Soil maps of the world // Geoderma. 2013. V. 207–208. P. 256–267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.003>
23. *Miller B.A., Schaetzl R.J.* The historical role of base maps in soil geography // Geoderma. 2014. V. 230–231. P. 329–339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.020>
24. *Minasny B., McBratney A.B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. V. 264. P. 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>

REFERENCES

1. *Akhmetova G.V., Bakhmet O.N.* Digital version of soil map of Karelia. Scale 1 : 500 000. Diversity of forest soil and biodiversity of forest. Proceedings of 5th All-Russian conference. Pushchino: IFKHiBPP RAN, 2013. P. 27–29 (in Russian).
2. Atlas of Karelian ASSSR. M.: Main department of geodesy and cartography, 1989. 40 p. (in Russian).

3. Cartography of Karelia. Part 1. Atlases and maps. Petrozavodsk, 2014. 77 p. (in Russian).
4. Cartography of Karelia. Part 2. Maps from books. Bibliographical references. Petrozavodsk, 2014. 665 p. (in Russian).
5. Comprehensive Geographic Information Systems. Elsevier, 2017. 1474 p.
6. Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective / Eds.: P. Lagacherie, A.B. McBratney, M. Voltz. Developments. Amsterdam: Elsevier, 2006. 600 p.
7. Digital soil mapping: theoretical and experiential surveys. Collection of articles. M.: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 2012. 357 p. (in Russian).
8. Electronic geographic atlas of Karelia. Petrozavodsk, 2015. CD.
9. *Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Morozova R.M., Solodovnikov A.N.* Soils and soil cover of protected areas of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAN, 2009. 109 p. (in Russian).
10. *Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Solodovnikov A.N., Morozov A.K.* Soils of Karelia: geochemical atlas. M.: Nauka, 2008. 47 p. (in Russian).
11. *Filatov N.N.* An experience of information support for regions of the north of Russian Federation on the status and changes of water objects and drains under the influence of climatic and anthropogenic factors. InterCarto/InterGIS 23: Proceedings of the International Conference. V. 1. M.: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2017. P. 130–140 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-130-142.
12. *Grunwald S., Thompson J.A., Boettinger J.L.* Digital soil mapping and modeling at continental scales: finding solutions for global issues. SSSAJ. 2011. V. 75, No 4. P. 1201–1213. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2011.0025>
13. *Hartemink A. E., Krasilnikov P., Bockheim J.G.* Soil maps of the world. Geoderma. 2013. V. 207–208. P. 256–267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.003>
14. *Marchenko A. I.* Soils of Karelia. M.; L.: Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1962. 310 p. (in Russian).
15. *Meshalkina Yu.L.* Digital soil mapping: theoretical and experiential surveys. Collection of articles. M.: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 2012. P. 9–18 (in Russian).
16. *Miller B.A., Schaetzl R.J.* The historical role of base maps in soil geography // Geoderma. 2014. V. 230–231. P. 329–339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.020>
17. *Minasny B., McBratney A.B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. V. 264. P. 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>
18. *Morozova R. M.* Soils and soil cover of Valaam archipelago. Petrozavodsk: Karel. nauch. tsentr RAN, 2002. 169 p. (in Russian).
19. National atlas of Russian soils. M.: Astrel', 2011. 632 p. (in Russian).
20. Republic of Karelia: atlas / Ed. by S. Erokhin, E. Moskvitin. SPb., 2001. 136 p. (in Russian).
21. Soil map of Karelia, Scale 1 : 500 000, compiler O.N. Mikhailovskaya, 1955. Archive of laboratory of forest pedology, Forest research Institute of KarSC RAS. (in Russian).
22. Soil map of Karelia, Scale 1 : 1 000 000, compiler R.M. Morozova, 1996 (Archive of laboratory of forest pedology, Forest research Institute of KarSC RAS) (in Russian).
23. Soils of Karelian ASSR. V. 1: South Karelia. M.; L.: Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1937. 104 p. (in Russian).
24. State soil map of USSR, pages Kirovsk, Petrozavodsk, Olonets, M 1 : 1 000 000, 1962 (Archive of laboratory of forest pedology, Forest research Institute of KarSC RAS).

Варшанина Т.П.¹, Шехов З.А.², Иззеддин М.Н.³

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РЕЛЬЕФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС

АННОТАЦИЯ

Параметрическая структурно подобная визуализация иерархической структуры поля тектонических напряжений решает задачи автоматизированного построения актуотектонических моделей и классификации тектонического рельефа.

Разработанный способ автоматизированного построения системной актуальной геодинамической модели территории базируется на комплексе известных методов [Филосовов, 1975; Варшанина, 2012].

Построение системной геодинамической модели территории Республики Адыгея произведено с помощью геоинформационного модуля.

По серии карт остаточного рельефа произведено автоматизированное выделение иерархической блоковой и линеаментной структуры и выявлены пространственно-временные закономерности тектонических движений территории за предыдущие 5 млн лет.

Методом структурной маски интегральных геофизических полей [Патент РФ № 2641510] разработаны структурно подобные параметрические пространственно-временные модели поля тектонических напряжений территории Адыгеи за плиоцен-четвертичное время.

Исследованы параметры генерального, фонового (движущего тектонические блоки) и локального (формирующегося в результате взаимодействия блоков) полей тектонических напряжений.

Выявлены закономерности пространственной дифференциации параметров генерального поля тектонических напряжений, проявляющиеся в формировании высотных ступеней рельефа: плоской волнистой и холмистой равнин, низкогогорного, среднегорного, высокогорного рельефа.

При общей закономерности нарастания величины параметров тектонического напряжения по направлению к осевой зоне Большого Кавказа отмечается волнообразная повторяемость преимущественных направлений их максимумов. Выявлены закономерности связи пространственной дифференциации параметров генерального поля тектонических напряжений с высотной морфометрией рельефа земной поверхности.

Установлена четкая связь локального поля тектонических напряжений с морфометрией рельефа в среднегорных и высокогорных зонах территории. Разработанная методология позволяет автоматизировать процесс параметрической визуализации и классификации иерархической структуры тектонических полей на территориях неограниченной площади.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: классификация тектонического рельефа, актуотектоническая модель, метод структурной маски интегральных геофизических полей, генеральное поле тектонических напряжений, фоновое поле тектонических напряжений, локальное поле тектонических напряжений.

¹ Адыгейский государственный университет, ул. Первомайская, д. 208, 385000, Майкоп, Россия, *e-mail*: vtp01@mail.ru

² Адыгейский государственный университет, ул. Первомайская, д. 208, 385000, Майкоп, Россия, *e-mail*: gic-info@yandex.ru

³ Адыгейский государственный университет, ул. Первомайская, д. 208, 385000, Майкоп, Россия, *e-mail*: gic-info@yandex.ru

Tatiana P. Varshanina¹, Zaurbiy A. Shekhov², M.N. Izzeddin³

GIS MODEL OF AUTOMATED CLASSIFICATION OF THE TECTONIC RELIEF

ABSTRACT

The parametrical structurally similar visualization of the hierarchical structure of the field of tectonic stress solves the problems of the automated construction of the actuatotectonic models and the classification of the tectonic relief.

The developed method of automated construction of the system actual geodynamic model of the territory is based on a set of known methods [Filosofov, 1960, 1975; Varshanina, 2012].

By means of the structural mask of integral geophysical fields [Patent for invention No 2641510] structurally similar parametric spatio-temporal models of the field of tectonic stress in the territory of Adygheya during the Pliocene-Quaternary time have been developed.

The parameters of the general, background (moving tectonic blocks) and local (formed as a result of the interaction of blocks) fields of tectonic stresses are investigated.

The patterns of spatial differentiation of the parameters of the general field of tectonic stresses are revealed, which are manifested in the formation of high-altitude steps of relief: flat undulating and hilly plains, low-mountain, medium-mountain and high-mountain relief.

A clear connection is established between the local field of tectonic stresses and the relief morphometry in the middle and high-mountain areas of the territory.

The developed methodology allows to automate the process of parametric visualization and classification of the hierarchical structure of tectonic fields in territories of unlimited area.

KEYWORDS: classification of the tectonic relief, the actuatotectonic model, the method of structural mask of integral geophysical fields, the general field of tectonic stresses, the background field of tectonic stresses, the local field of tectonic stresses.

ВВЕДЕНИЕ

В географии имеется многовековой опыт визуализации больших данных о поверхности планеты и методов их аналитической обработки. Этот опыт реализуется в автоматизированных географических системах накопления, анализа, систематизации и пространственной визуализации больших географических данных. К большим относятся и данные, необходимые для построения геодинамических моделей для классификации тектонического рельефа на территориях значительной площади.

Тектонический рельеф относится к области интересов двух отраслевых наук о Земле – географии и геологии. В геологии тектонические объекты – это тела, имеющие единые знаки движения и геологическое строение, определяющие формирование неровностей земной поверхности или ее рельефа. В географии к важнейшему фактору относится энергетика рельефа, т. е. пространственная дифференциация потенциала силы тяжести, с которым связано перераспределение вещества и энергии по земной поверхности и ре-

¹ Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems, Pervomayskaya str., 208, 385000, Maikop, Russia, e-mail: vtp01@mail.ru

² Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems, Pervomayskaya str., 208, 385000, Maikop, Russia, e-mail: gic-info@yandex.ru

³ Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems, Pervomayskaya str., 208, 385000, Maikop, Russia, e-mail: gic-info@yandex.ru

гиональные особенности формирования природных комплексов. В этом случае при классификации тектонических объектов на первый план выступает скорость их современных горизонтальных и вертикальных движений, осуществляемых в реологических условиях геологической среды.

В геотектонике разработаны тектонические карты России, отражающие закономерную ориентацию зон разломов. Эти карты не в полной мере соответствуют реальной геодинамической обстановке на земной поверхности, так как разломы, идентифицируемые методами геологии, различаются по степени активности в настоящее время.

Визуализацию системной геодинамической модели, соответствующей современному полю тектонических напряжений, предлагает метод морфоструктурного районирования (МСР) [Ранцман, Гласко, 2004]. Этим методом по информативным параметрам топографических карт выявляются тектонические элементы: блоки, линеаменты и узлы в их реальных границах, и по формализованным признакам классифицируется иерархия тектонических структур. Метод МСР позволяет строить актуотектоническую модель территории, но не отображает необходимые для географических исследований параметры современных тектонических движений.

Параметрическая структурно подобная визуализация иерархического строения поля тектонических напряжений решает задачи автоматизированного построения актуотектонических моделей и классификации тектонического рельефа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования производились по топографическим картам Краснодарского края и Республики Адыгея масштаба 1 : 200 000.

Разработанный способ автоматизированного построения актуальной геодинамической модели территории базируется на комплексе известных методов:

- морфометрического поиска тектонических структур В.П. Философова [1960, 1975];
- структурной маски интегральных геофизических полей [Варшанина, 2012; Патент РФ № 2641510].

Предложенный В.П. Филосовым морфометрический метод построения полибазисных/вершинных поверхностей позволяет вычислить приближенные относительные амплитуды и направленность новейших тектонических движений, активность геодинамических процессов. Так, серии карт остаточного рельефа отображают пространственно-временную динамику формирования блоковой геодинамической модели территории, структурно подобной эндогенному полю тектонических напряжений. В качестве параметра направления и интенсивности исторических трендов движения блоков применяется величина и румб градиента приращения/убывания мощности слоя земной коры между базисными поверхностями за конкретный период геологического времени. Румб градиента указывает на направление наиболее интенсивного взаимодействия соседних блоков, т. е. на направление движения блока, а скалярная величина градиента отображает тип взаимодействия блоков. Построенные градиентные поля соответствуют структуре эндогенного поля энергии в фокусе земной поверхности, формирующегося в реальной геологической среде с присущими ей реологическими свойствами. Таким образом, создается структурная маска (визуализация) интегрального геофизического поля тектонических напряжений, параметры пространства состояний которого можно использовать для классификации тектонического рельефа.

Построение системной геодинамической модели территории Республики Адыгея произведено с помощью автоматизированного геоинформационного модуля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Относительно автоматизированно ранжированной гидросети Адыгеи построены полибазисные поверхности (потенциальные поверхности выравнивания) от первого до четвертого порядка, отражающие динамику поверхности рельефа за плиоцен-четвертичное время.

Серия карт остаточного рельефа, представляющего собой мощность слоя между базисными и топографической поверхностями, обеспечивает пространственно-временную визуализацию тектонического строения территории и дифференциации ее вертикальных движений. Эти карты свидетельствуют о том, что на территории Адыгеи 5 млн лет назад в предгорном прогибе, от линеамента долины р. Кубани до Ахтырского разлома и Северо-Юрской депрессии, были сформированы все основные современные тектонические блоки и линеаменты. В северной части макроблока южной оконечности Скифской плиты наблюдались отрицательные вертикальные движения. К югу от предгорного прогиба, в зоне складчатости, скорость положительных вертикальных движений резко увеличивалась, система разломов была слабо выражена (рис. 1, а). За последующий период от плиоцена до четвертичного времени нарастала площадь поверхности, испытывающей опускание, в северной части предгорного прогиба, увеличивалось дробление крупных тектонических блоков и снижалась скорость поднятия в зоне стесненной деформации горного сооружения (рис. 1, б).

Таким образом, осуществлено автоматизированное выделение иерархической системы блоковой и линеamentной структуры и выявлены пространственно-временные закономерности тектонических движений территории.

Методом структурной маски интегральных геофизических полей разработаны структурно подобные параметрические пространственно-временные модели поля тектонических напряжений территории Адыгеи за плиоцен-четвертичное время.

Исследованы параметры генерального, фонового (движущего тектонические блоки) и локального (формирующегося в результате взаимодействия блоков) полей тектонических напряжений.

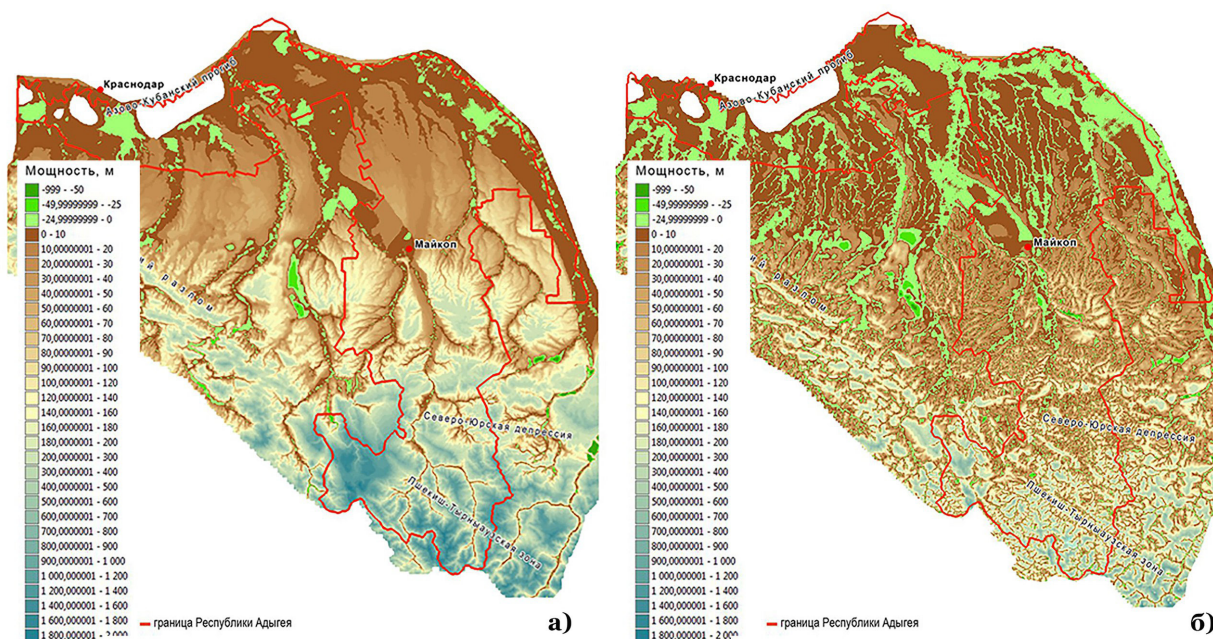


Рис. 1. Остаточный рельеф: а – плиоцен; б – четвертичный период

Fig. 1. Residual relief: а – Pliocene; б – Quaternary period

Пространственная дифференциация параметров генерального поля тектонических напряжений (рис. 2) проявляется в формировании высотных ступеней рельефа (рис. 3). В пределах плоской равнины статистическое распределение по румбам горизонта параметров тектонического напряжения является нормальным симметричным (рис. 4), что, как известно, соответствует зонам устойчивого равновесия, при этом с преобладающим направлением на южные румбы.

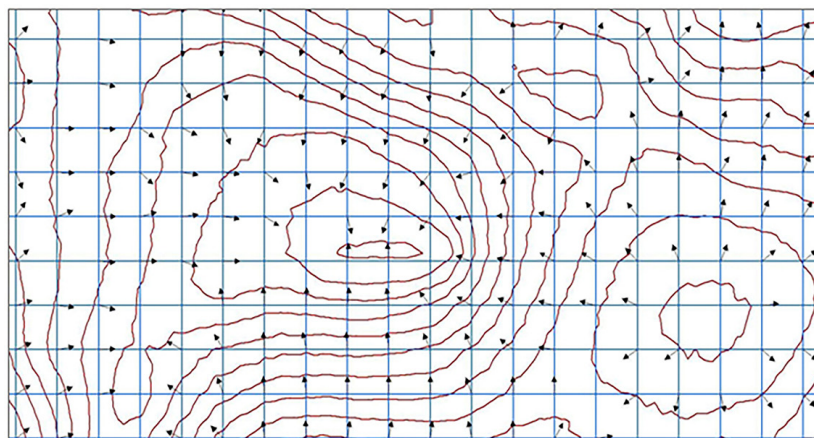


Рис. 2. Матрица нормализованных значений градиента
генерального поля тектонических напряжений
Fig. 2. Matrix of normalized values of the gradient
of the continuum field of tectonic stresses

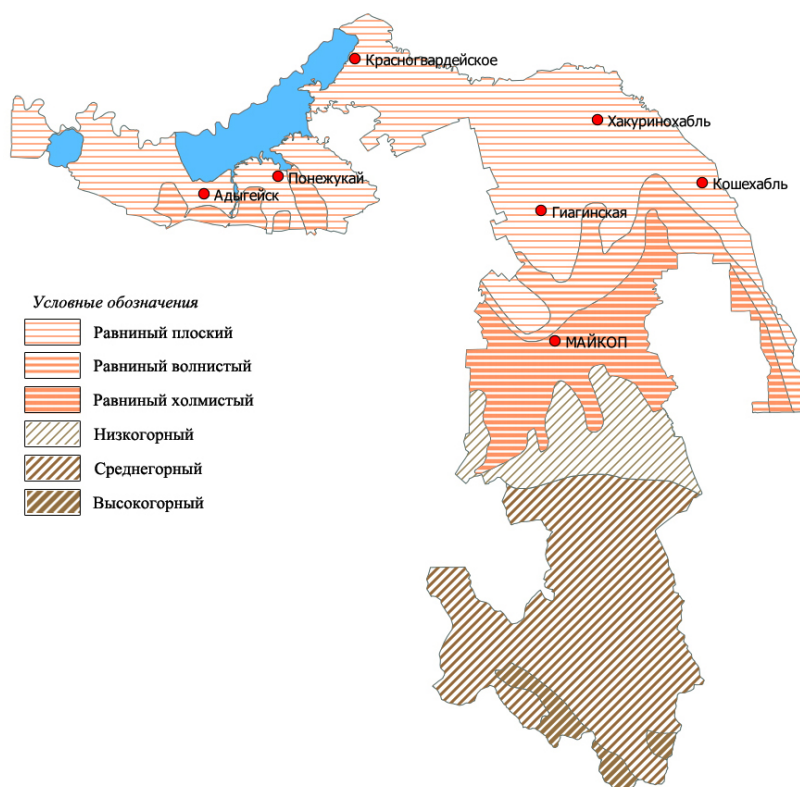


Рис. 3. Морфометрические ступени высот территории Адыгеи
Fig. 3. Morphometric steps of the heights of the territory of Adygeya

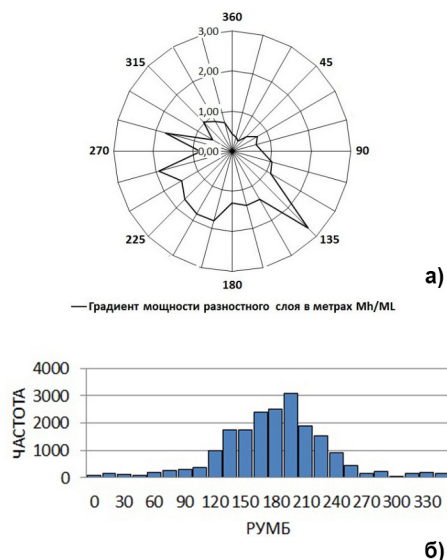


Рис. 4. Плоская равнина:
а – распределение параметров градиента континуального поля тектонических напряжений; б – нормальное мономодальное распределение значений градиента по румбам

Fig. 4. Flat plain:
а – the distribution of the parameters of the gradient of the continuum field of tectonic stresses; б – the normal monomodal distribution of the gradient values over the compass points

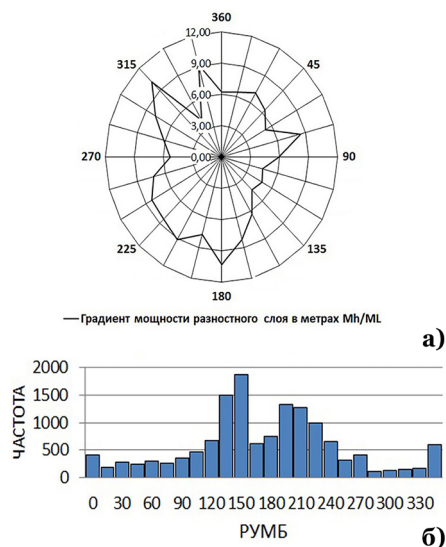


Рис. 6. Холмистая равнина:
а – распределение параметров градиента континуального поля тектонических напряжений; б – бимодальное распределение значений градиента по румбам

Fig. 6. Hilly plain:
а – the distribution of the parameters of the gradient of the continuum field of tectonic stresses; б – bimodal distribution of the gradient values over the compass points of the horizon

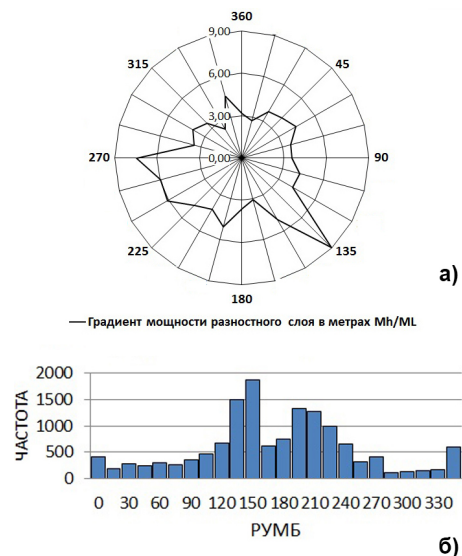


Рис. 5. Волнистая равнина:
а – распределение параметров градиента континуального поля тектонических напряжений относительно румбов горизонта; б – бимодальное распределение значений градиента по румбам

Fig. 5. Undulating plain:
а – the distribution of the parameters of the gradient of the continuum field of tectonic stresses; б – bimodal distribution of the gradient values over the compass points

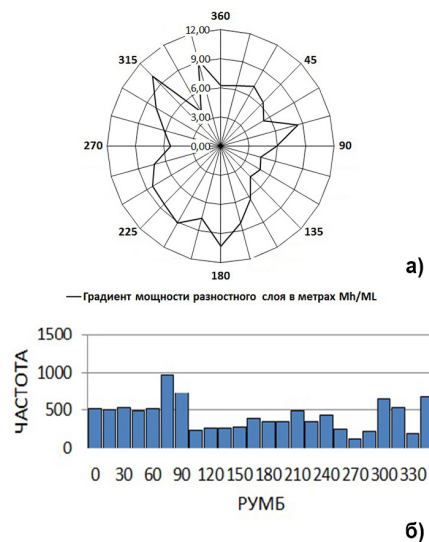


Рис. 7. Низкогорный рельеф:
а – распределение параметров градиента континуального поля тектонических напряжений; б – слабо выраженное полимодальное распределение значений градиента по румбам

Fig. 7. Low-mountain relief:
а – the distribution of the parameters of the gradient of the continual field of tectonic stresses; б – a weakly expressed polymodal distribution of the gradient values over the compass points of the horizon

На волнистой равнине в распределении по румбам горизонта параметров тектонического напряжения выражен его симметричный бимодальный характер с преобладанием восточных и западных румбов (рис. 5), что, по-видимому, связано с поступательным движением в условиях слабой стесненной деформации.

Холмистая равнина характеризуется возрастанием интенсивности тектонического напряжения с сохранением бимодального распределения значения его параметров и с переориентацией румба максимумов на юго-запад и восток (рис. 6). Диаграммы величин параметров тектонического напряжения по румбам сторон света для холмистой и волнистой равнин имеют сходство.

В низкогорьях интенсивность тектонического напряжения продолжает возрастать, отмечается слабо выраженное полимодальное распределение его параметров и резкая переориентация румбов максимумов на север и юг (рис. 7).

В среднегорье интенсивность тектонического напряжения возрастает по всем румбам с некоторым максимумом на север. Распределение значений параметров интенсивности тектонического напряжения – полимодальное (рис. 8).

В области Главного хребта величины параметров тектонического напряжения достигают наибольшего значения при мономодальном распределении частоты их встречаемости и с максимумами, ориентированными на восток, юго-юго-восток и запад, северо-северо-запад (рис. 9).

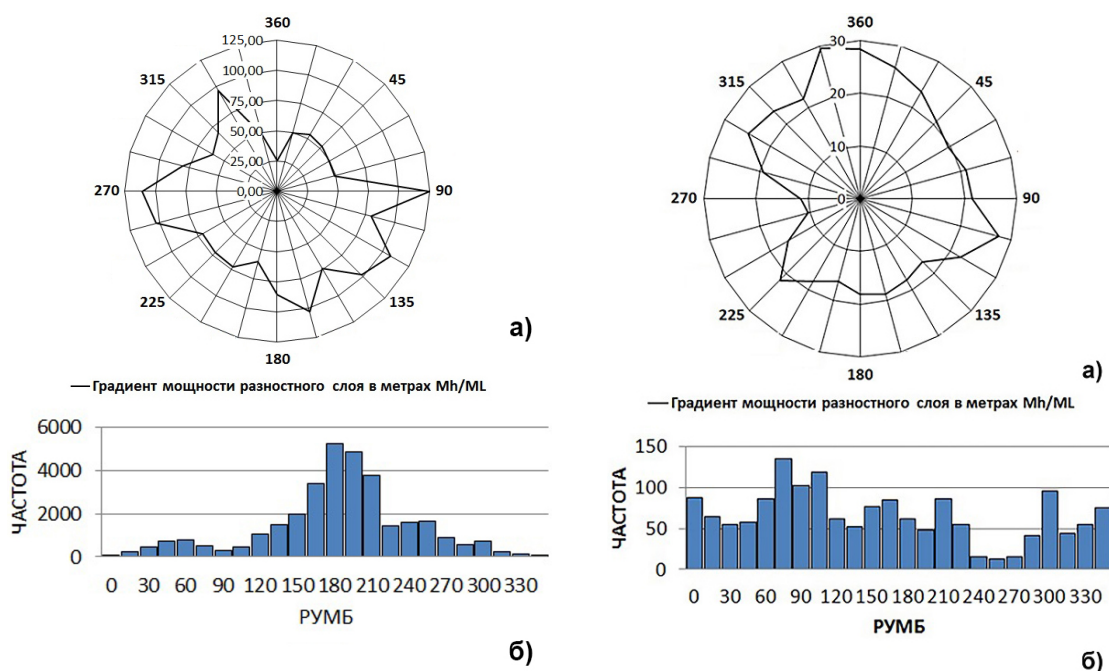


Рис. 8. Среднегорный рельеф:

а – распределение параметров градиента континуального поля тектонических напряжений; б – полимодальное распределение значений градиента по румбам

Fig. 8. Middle-mountain relief:

а – the distribution of parameters of the gradient of the continuum field of tectonic stresses; б – the polymodal distribution of the gradient values over the compass points of the horizon

Рис. 9. Главный хребет:

а – распределение параметров градиента континуального поля тектонических напряжений; б – полимодальное распределение значений градиента по румбам

Fig. 9. High-mountain relief:

а – the distribution of parameters of the gradient of the continuum field of tectonic stresses; б – polymodal distribution of the gradient values over the compass points of the horizon

Таким образом, при общей закономерности нарастания величины параметров тектонического напряжения по направлению к осевой зоне Большого Кавказа отмечается волнообразная повторяемость преимущественных направлений их максимумов. Выявлены закономерности связи пространственной дифференциации параметров континуального поля тектонических напряжений с высотной морфометрией рельефа земной поверхности. Информативна роль континуального поля тектонических напряжений в линеаментах, которое визуализирует в них волны растяжения и сжатия (рис. 10).

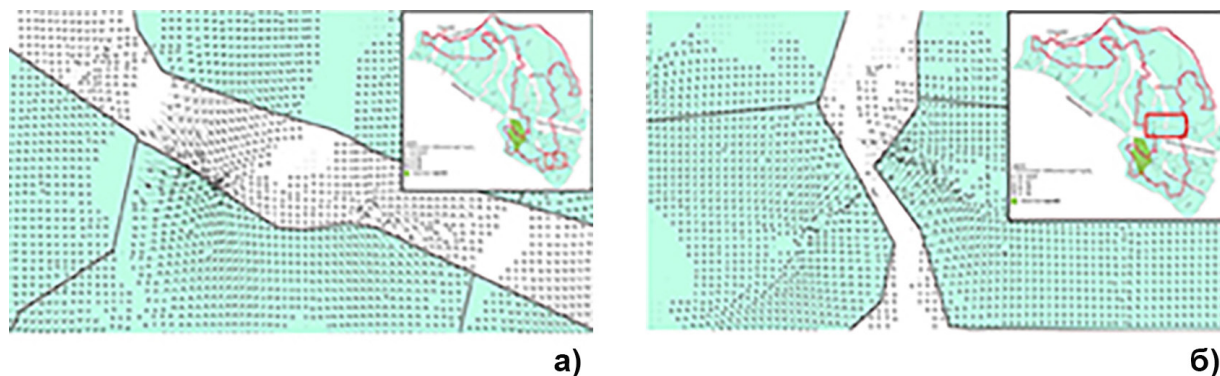


Рис. 10. Дифференциация тектонических напряжений в линеаментах:
а – напряжение сжатия; б – напряжение растяжения
Fig. 10. Differentiation of tectonic stresses in lineaments:
a – tensile stress; b – compressive stress



Рис. 11. Структура фоновое поле тектонических напряжений, движущих тектонические блоки
Fig. 11. Structure of the background field of tectonic stresses, moving tectonic blocks

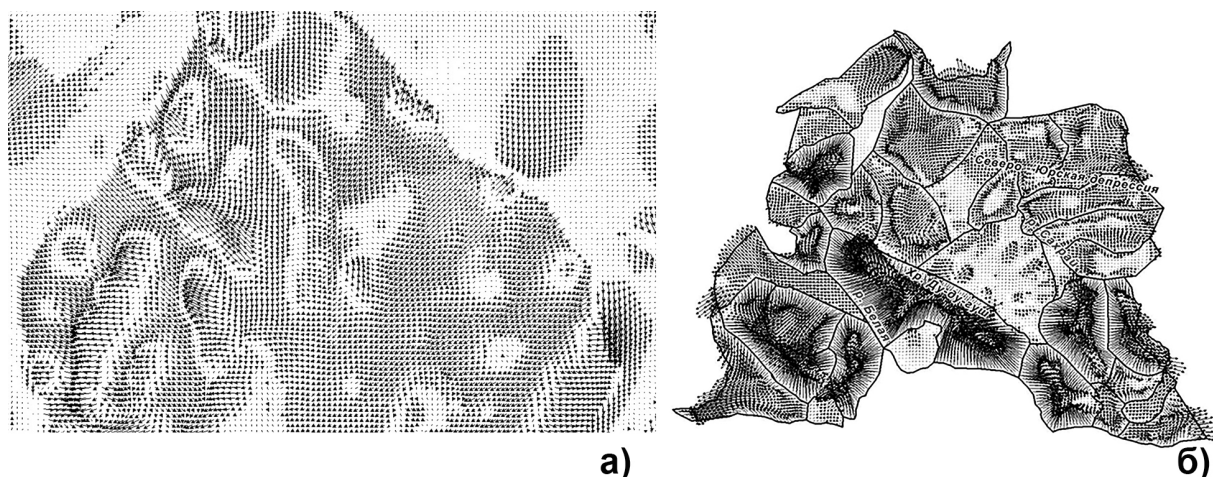


Рис. 12. Структура локального поля тектонических напряжений:
а – низменная равнина; б – среднегорье

Fig. 12. Structure of local and tectonic stresses:
а – land plain; б – the middle mountains

Фоновое поле тектонических напряжений, отображенное результирующими относительно каждого блока наибольшими градиентами мощности разностного слоя, визуализирует направление и относительную скорость движения тектонических блоков и тип их взаимодействия (рис. 11).

В среднегорных и высокогорных зонах исследуемой территории связь локального поля тектонических напряжений с морфометрией рельефа четко прослеживается визуально (рис. 12). Для установления такой связи в равнинно-низкогорной зоне необходимы дополнительные статистические исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методология, основанная на морфометрическом методе поиска тектонических структур и методе структурной маски интегральных геофизических полей, позволяет автоматизировать процесс параметрической визуализации и классификации иерархической структуры тектонических полей на территориях неограниченной площади.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варшанина Т.П. Разработка хорошо структурированной модели геопространства на основе метода структурной маски энергетических геополей // Вестн. Адыгейского гос. ун-та. Серия естественно-математических и технических наук. 2012. № 4 (110). С. 176–179.
2. Варшанина Т.П., Хунагов Р.Д., Коробков В.Н. Способ построения векторного пространственно-временного поля тектонических напряжений на территорию неограниченной площади. Патент РФ № 2641510.
3. Раницман Е.Я., Гласко М.П. Морфоструктурные узлы – места экстремальных природных явлений. М.: Медиа-ПРЕСС, 2004. 224 с.
4. Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поиска тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1960. 69 с.
5. Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: СГУ, 1975. 232 с.

REFERENCES

1. *Philosopov V.P.* The use of maps of the basal surface to identify modern tectonic movements. Saratov, 1959. 215 p. (in Russian).
2. *Philosopov V.P.* Fundamentals of the morphometric method of tectonic structures identification. Saratov: Publishing House of the Saratov University, 1975. 232 p. (in Russian).
3. *Rantsman E.Ya., Glasko M.P.* The morphostructural nodes – the places of extreme natural phenomena. M.: Media-PRESS, 2004. 224 p. (in Russian).
4. *Varshanina T.P.* Development of a well-structured model of geospace on the basis of a structural mask method of power geofields. Bulletin of Adyghe State University. A series of natural-mathematical and technical sciences. 2012. No 4 (110). P. 176–179 (in Russian).
5. *Varshanina T.P., Khunagov R.D., Korobkov V.N.* Method of constructing a vector space-time field of tectonic stresses on the territory of an unlimited area. Patent for invention No 2641510 (in Russian).

ANALYSE DE L'AÉROLOGIE LOCALE DANS LA RÉGION DE BEYROUTH DURANT LA PÉRIODE ESTIVALE

RESUME

Beyrouth une région littorale méditerranéenne ayant une topographie assez complexe est régulièrement soumise aux systèmes d'alternance de brises en période estivale. On s'est appuyé sur une base de données constituée de notre propre réseau de mesure lors de campagnes de terrain réalisées en 2017. Cet article propose une étude sur les variabilités spatio-temporelles des brises thermiques en relation avec la topographie et l'occupation du sol dans la région de Beyrouth. L'analyse du MNT a permis de cartographier le relief de la ville (littoral, collines et vallées). L'occupation du sol a été réalisée par télédétection pour produire une cartographie inspirée de la forme et de la nomenclature de CORINE LANDCOVER. Ces travaux préliminaires ont servi au choix de la réalisation de la campagne de mesures. Les campagnes de mesures itinérantes ont été réalisées au niveau des vallées débouchant la ville et la cote et dans la ville afin de détecter les brises nocturnes et diurnes. Lorsque la topographie favorise sensiblement la canalisation de l'air, les brises sont également bien marquées: ce sont les brises orographiques (la brise de versant et la brise de vallée) qui peuvent se développer sur des dizaines de km de long et atteindre des vitesses relativement importantes c'est ce qui a été démontré dans notre zone d'étude.

MOTS CLÉS: brises thermiques, cartographie, mesures itinérantes.

ANALYSIS OF LOCAL AEROLOGY IN THE REGION OF BEIRUT DURING THE SUMMER PERIOD

ABSTRACT

Beirut a Mediterranean littoral area having a rather complex topography is regularly subjected to the systems of alternation of breezes in summer period. One was based on a database made up of our own network of measurement at the time of campaigns of ground carried out in 2017. This article proposes a study on space-time variabilities of the thermal breezes in relation to the topography and the occupation of the ground in the area of Beirut. The analysis of the MNT made it possible to chart the relief of the city (littoral, hills and valleys). The occupation of the ground was carried out by teledetection to produce a cartography inspired of the form and nomenclature of CORINE LANDCOVER. This preliminary work was used for the choice of the realization of the series of measurements. The series of itinerant measurements were carried out at the valleys emerging the city and the center of the city in order to detect the night and diurnal breezes. When topography supports the drain of the air, the breezes are also well marked: in fact the orographical breezes (breeze of slope and breeze of valley) can develop on tens of km length and reach relatively important speeds it is what was shown in our zone of study.

KEYWORDS: thermal breezes, cartography, itinerant measures.

INTRODUCTION

Les principes de formation ainsi que les différentes manifestations des brises thermiques sont bien connus. Si ces éléments sont essentiels pour comprendre les conditions d'apparition et le fonctionnement des brises, ils sont toutefois insuffisants, à eux seuls, pour faire une analyse de ces

¹ Université Libanaise, département de géographie, faculté des lettres et sciences humaines, Fanar, Liban, *e-mail:* samarsakr2005@hotmail.com

circulations dans une région précise. Plusieurs auteurs ont en effet montré que, selon le site étudié, les brises peuvent se caractériser différemment. Chaque manifestation doit être impérativement adaptée aux caractères régionaux, voire locaux, du site sur lequel l'étude est menée puisqu'elle dépend de nombreux facteurs d'échelle locale, comme l'orientation de la côte par rapport au soleil, la topographie et la rugosité du sol [Pédélaborde, 1987].

Dans cet article, nous présentons l'étude de climatologie locale qui a permis de déterminer l'aérodynamisme local de la région de Beyrouth (notamment le fonctionnement des brises marines et terrestres). Les écoulements locaux étant très fortement influencés par l'état de surface, cette expérimentation a nécessité la mise en place d'une méthode expérimentale adaptée aux échelles fines prenant en compte l'ensemble des facteurs caractérisant l'état de surface (ex : topographie, occupation du sol, ...).

Manifestation des brises

La naissance de ces circulations suppose la mise en place de conditions synoptiques particulières, ainsi qu'un certain gradient de température terre/mer. De plus, l'hétérogénéité de la surface engendre une importante variabilité météorologique et climatique locale au niveau de la couche limite de l'atmosphère. La topographie, ainsi que l'occupation du sol, peuvent donc influencer sur les manifestations des brises de mer et de terre et ainsi engendrer des caractéristiques particulières selon le site. La hiérarchisation des éléments favorisant et perturbant ces circulations suivant l'emboîtement des échelles spatiales et temporelles est donc un travail essentiel pour le traitement de l'information climatique et pour l'interprétation des données. Cette étape de délimitation des différents niveaux d'échelles est également impérative pour déterminer les sites de mesure qui permettront d'évaluer l'impact de l'état de surface et de mettre en évidence la variabilité spatio-temporelle de l'aérodynamisme local. Cette méthode est liée au fonctionnement de l'atmosphère. En effet, "sachant qu'une même masse d'air, générant un même type de temps, peut concerner un territoire étendu, il est certain que sur une entité plus petite, des caractères communs sont présents" [Quénol, 2002]. Et plus le niveau d'observation s'affine, plus les éléments influant sur les paramètres météorologiques sont importants. Ainsi Beltrando et Chemery écrivaient-ils en 1995: "Schématiquement, la compréhension augmente au fur et à mesure que l'espace se réduit... les notions d'échelles spatiale et temporelle sont donc essentielles pour sélectionner les informations et pour choisir l'implantation des instruments météorologiques".

L'application de la méthode de régression des échelles spatio-temporelle à l'étude des brises de mer et de terre dans la région de Beyrouth, qui repose sur la hiérarchisation des phénomènes atmosphériques en fonction des niveaux scalaires auxquels ils se manifestent [Carréga, 1989; Quénol, 2002], peut se caractériser de la manière suivante:

À l'échelle synoptique (plusieurs centaines de kilomètres), les conditions favorables à l'apparition des brises de mer et de terre, elles-mêmes soumises à la circulation atmosphérique générale, sont mises en évidence. Une situation anticyclonique favorise en effet la mise en place de ces circulations. Ce niveau d'échelle est un niveau "de compréhension générale" dans le sens où la présence d'un anticyclone peut entraîner la formation des brises de mer et de terre quelle que soit la région littorale considérée.

À l'échelle locale (10 km – 1 km), voire microlocale (100 m – 1 m), les unités géographiques déterminant les modifications climatiques sont liées à la topographie et à l'occupation du sol. C'est la diversité de ces paramètres sur des espaces relativement restreints qui va engendrer une forte variabilité spatiale de l'aérodynamisme local. Ce climat local est toujours lié au climat régional auquel il appartient, mais avec des modifications caractérisées par des échanges énergétiques locaux [Beltrando, 1995].

Il peut donc être retenu que les brises de mer et de terre, comme toute circulation d'échelle régionale, dépendent de différents phénomènes d'échelle supérieure (conditions

synoptiques, conditions régionales), qui permettent de comprendre le phénomène en tant que tel et d'échelle inférieure (facteurs locaux et microlocaux) qui apportent des informations quant à leur fonctionnement. Ainsi, pour améliorer les connaissances sur les brises thermiques dans la région de Beyrouth, ces différents niveaux d'échelle doivent être considérés et une approche méthodologique doit être adoptée en conséquence.

MÉTHODES ET DONNÉES

Pour définir la topographie et l'occupation du sol nous avons eu recours à des prises de vue aérienne pour la topographie et une image Landsat Thematic Mapper pour l'occupation du sol. L'étude de ces données nous a permis de mieux comprendre les relations entre le milieu, les brises thermiques et la pollution atmosphérique, aux échelles fines.

Les instruments utilisés pour mesurer la direction et la vitesse du vent sont des girouettes portables: une girouette portable Kestrel et un anémomètre-girouette sans fil Vion C6500.

La topographie complexe de Beyrouth

Aux échelles fines, la topographie peut perturber la circulation des brises. La région de Beyrouth est une région littorale au relief assez accidenté et élevé (fig. 1). Plusieurs éléments distincts ont des effets sur la circulation des brises.

- À l'Est de la région de Beyrouth les plages rocheuses de 10 mètres d'altitude en moyenne longent toutes la côte de part et d'autre de Ras Beyrouth qui se projette dans la mer.
- La plaine étroite de Beyrouth de 40 mètres d'altitude en moyenne est accidentée par plusieurs hauteurs dont Hamra et Achrafiyyé d'une hauteur maximale de 100 mètres.
- À l'Ouest à 7 kilomètres à vol d'oiseau environ, la plaine de Beyrouth s'adosse contre le massif montagneux du Mont-Liban. Des sommets de 2300 mètres d'altitude en moyenne ainsi que des plateaux inclinés et taillés par des vallées à pentes raides (fig. 2) dominent la ville. Deux vallées principales encaissées avec des gorges grandioses, débouchent avec un faible élargissement sur la ville.

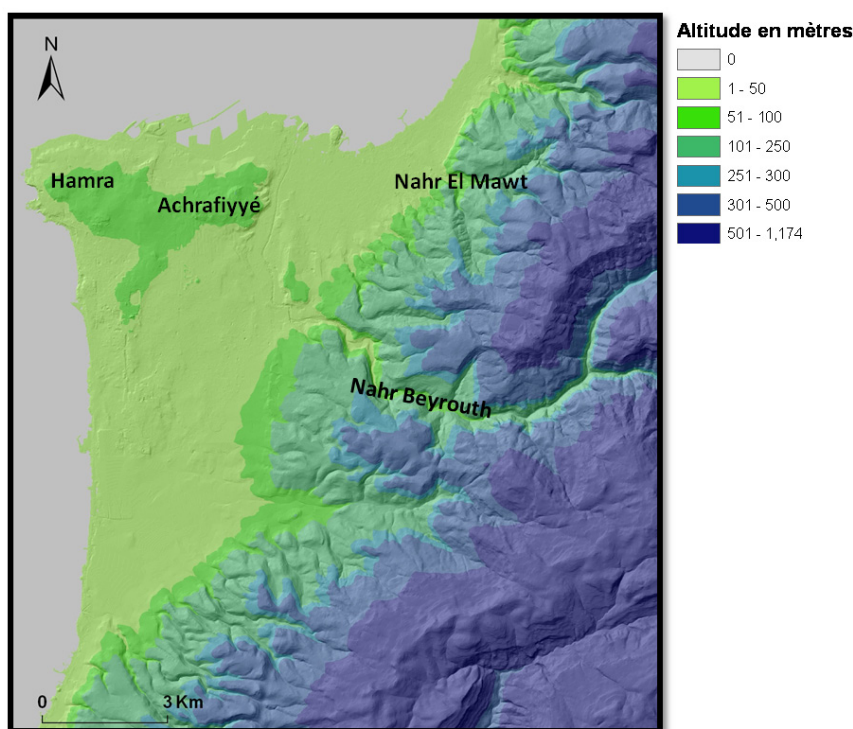


Fig. 1. Topographie de la région de Beyrouth
Fig. 1. Topography of the region of Beirut

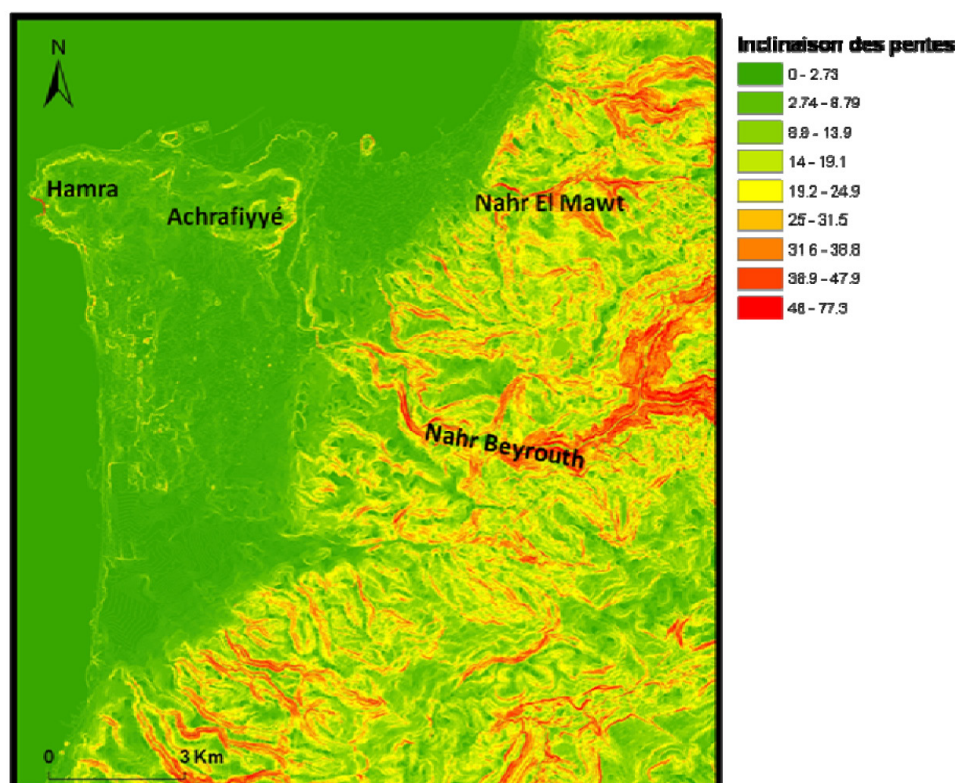


Fig. 2. Carte des pentes en degré
Fig. 2. Map of slopes in degree

Occupation du sol

L'occupation du sol a une influence importante sur l'aérodynamisme de la région. En effet selon la rugosité de surface, le flux d'air au niveau du sol peut être freiné ou dévié. De plus, la pollution est étroitement liée aux caractéristiques de l'occupation du sol.

Trois parties bien distinctes peuvent être identifiées dans la région de Beyrouth (fig. 3).

- Le littoral se distingue par des plages rocheuses derrière lesquelles de petits marais peuvent être observés surtout à proximité du port de Beyrouth. Vers le Sud, l'aéroport international de Beyrouth longe le bord de la mer.

- La ville de Beyrouth et son agglomération constituent une zone urbaine densément peuplée (2 millions d'habitants) regroupant les activités commerciales et les services les plus importants du pays, assurant un nombre d'emplois élevé attirant chaque jour un nombre important de personnes, induisant des déplacements pendulaires et donc des émissions de polluants d'origines automobile. Le réseau routier de la ville est divisé en quatre groupes hiérarchiques : le boulevard périphérique autour de la ville dont la longueur approximative est de 3.6 km ayant des voies de 3.50 mètres de largeur comporte des passages souterrains, des tunnels afin d'avoir accès au centre-ville. Ce boulevard connaît des flux quotidiens très importants de voiture, acheminant la population des régions périphériques vers la ville. Les routes principales représentent à leur tour des points d'accès importants au centre-ville, leurs largeurs sont comprises entre 3.25 et 3 mètres et le nombre quotidien de voitures est aussi très élevé. Les routes secondaires et tertiaires servent essentiellement de desserte locale aux zones résidentielles et commerciales.

- Vers l'Ouest les plateaux inclinés incisés par des vallées comportent sur leurs crêtes des installations de villages. Les pentes sont fréquemment couvertes de garrigue avec de petits buissons, des cistes à fleurs blanches, des chênes et des forêts mélangées dans la vallée de Nahr Beyrouth.

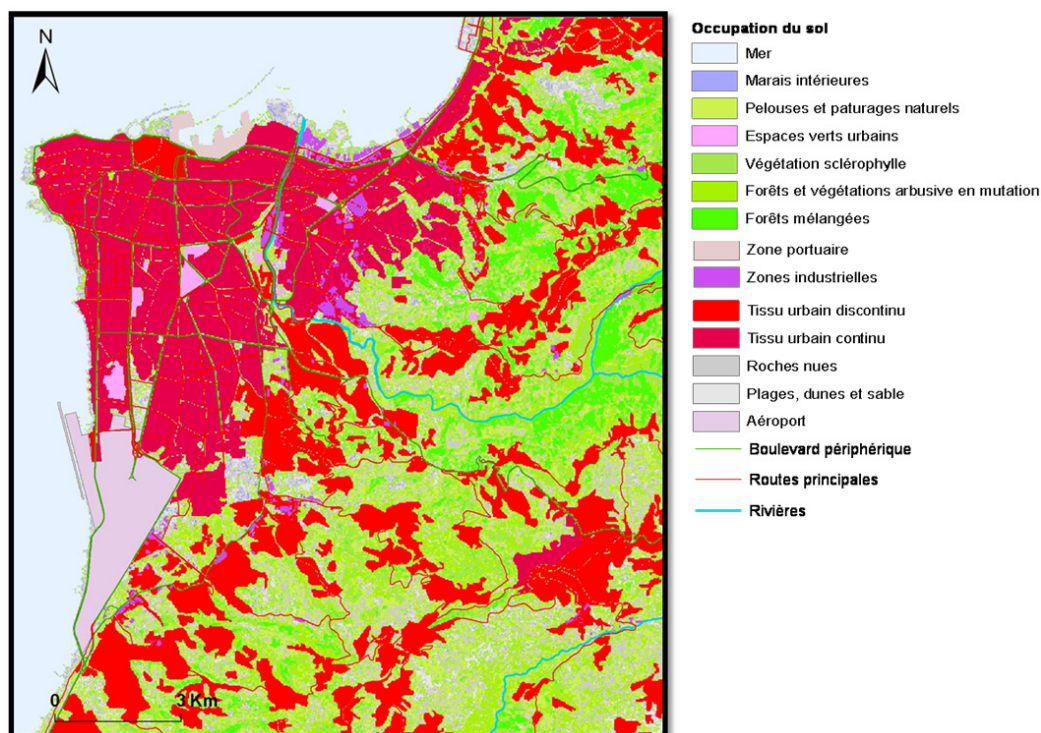


Fig. 3. L'occupation du sol dans la région de Beyrouth

Fig. 3. The occupation of the soil in the area of Beirut

Beyrouth et son agglomération constituent un milieu très contraignant pour les brises thermiques en raison de la rugosité très importante provoquée par les bâtiments et la présence des hauteurs densément peuplées (de 90 mètres d'altitude en moyenne) à proximité de la côte qui freinent et dévient les flux en surface. Notons aussi que des éléments perturbateurs peuvent être observés le long de la côte rocheuse à cause de la présence de falaises.

Les hauteurs et les plateaux inclinés peuvent être considérés comme des milieux très perturbateurs, en effet la topographie assez accidentée peut engendrer de nombreuses perturbations pour les brises. Il se peut, d'une part, que la brise de mer atteigne difficilement les hauteurs, et d'autre part, en période nocturne, il se peut que des brises de pente se mettent en place et domine les écoulements nocturnes de la ville. Lorsque les conditions atmosphériques sont stables avec un ciel clair et un vent faible, des écoulements de pentes (nommés catabatiques) peuvent se mettre en place. L'air froid issu des déperditions énergétiques de surface des hauts sommets du Mont-Liban s'écoule par gravité au niveau du sol suivant les lignes de pente [Carrega, 1994]. Ces écoulements peuvent s'associer avec les brises des vallées encaissées surtout celle du Nahr Beyrouth et canaliser le flux.

La mise en place d'une campagne de mesures itinérantes à l'échelle microlocale a permis en premier lieu d'avoir une zone d'étude avec un plus grand nombre de points de mesures pour mettre en évidence l'existence de brises nocturnes qui sont liées à la topographie et à l'occupation du sol. L'inconvénient dans ce type de mesure est l'écart temporel entre chaque point de mesure.

Lorsque les conditions atmosphériques sont stables avec un ciel clair et un vent synoptique faible (conditions radiatives), des écoulements très localisés se mettent en place selon les caractéristiques locales de la topographie. Les stations de mesures fixes sont éloignées les unes des autres pour couvrir l'ensemble de la ville. Les mesures itinérantes ont permis de contourner ce problème. Le matériel utilisé était suffisamment sensible pour observer les flux légers.

32 points de mesures en surface (fig. 4) ont été pris entre le littoral et les hauteurs situées à l'Est de la ville au pied du Mont-Liban. Ces points ont été choisis de manière à détecter les brises de terre et les brises de pente ou catabatiques liées à la topographie complexe de ce milieu.

Comme le nombre de points de mesures fixes est limité et ne couvre pas la totalité des reliefs accidentés et des vallées principales (Nahr Beyrouth et Nahr el Mawt) débouchant sur la ville, une campagne de mesures itinérantes a été dirigée afin d'étudier l'installation des brises de mer et la bascule entre la période nocturne et la période de l'installation de la brise de mer dans ces endroits (fig. 4).

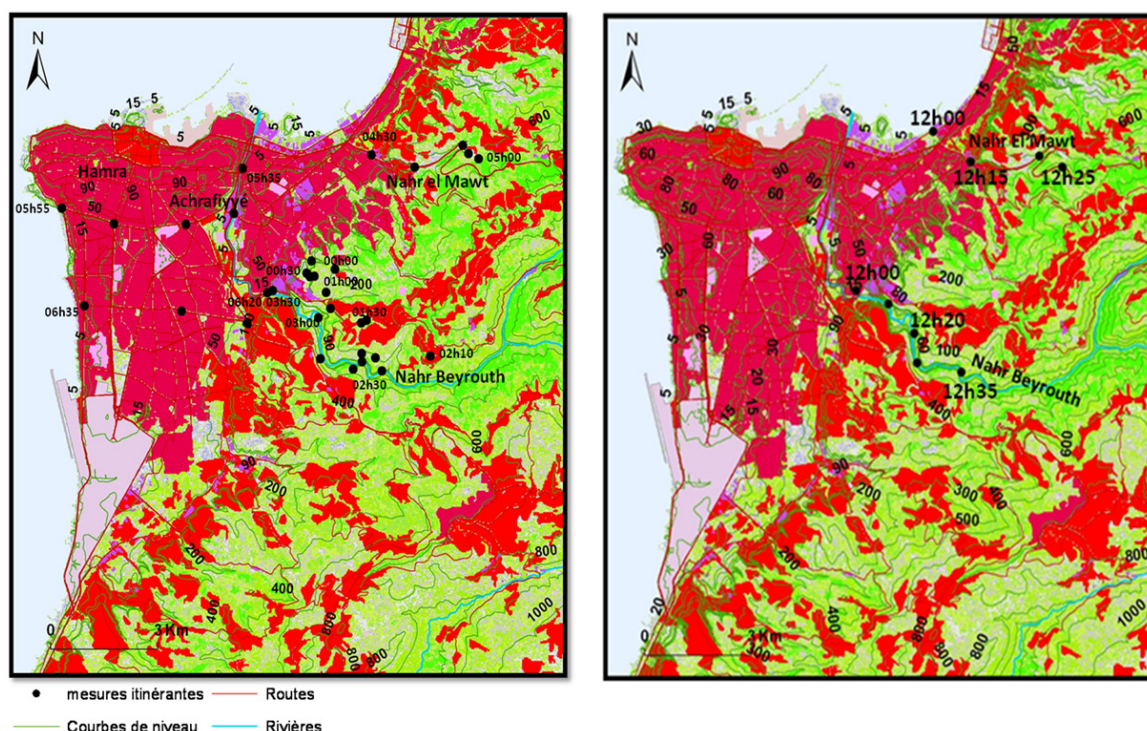


Fig. 4. Localisation des points des mesures itinérantes
Fig. 4. Location of points of measurements the travelling

Les points de mesures localisés près du littoral avaient pour but de renseigner l'existence ou l'absence des brises de terre dans cette partie de la ville présentant une importante rugosité de surface liées aux constructions.

Les mesures ont été réalisées dans la vallée profonde et encaissée (dans le plateau de la partie Ouest du Mont-Liban) de Nahr Beyrouth, pour observer la canalisation du flux et des écoulements de pente. Des mesures ont été faites dans la vallée encaissée mais moins profonde, de Nahr El Mawt pour détecter la présence similaire d'un flux canalisé.

Les mesures effectuées autour des collines de Hamra et Achrafiyyé, densément construites et peuplées, ont mis en évidence l'existence de brises de pente, ainsi que l'effet de la topographie du Mont-Liban sur ces régions.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Brises nocturnes: les résultats de la campagne de mesures itinérantes à Beyrouth

L'objectif est d'améliorer les connaissances sur les écoulements nocturnes observés en période de brises. Le but est d'analyser les caractéristiques des brises nocturnes, ainsi que les brises diurnes dans les deux vallées principales (Nahr Beyrouth et Nahr el Mawt) débouchant

sur Beyrouth. En effet les données enregistrées par le réseau de mesures local ont permis de les détecter. La vitesse du vent mesurée pendant la nuit peut être faible. Le réseau de mesure adopté ne permet pas de couvrir toute la région, surtout dans les reliefs accidentés et les vallées encaissées situées à l'Est de la ville. Lorsque les conditions atmosphériques sont stables avec un ciel clair et un vent synoptique faible, des écoulements très localisés peuvent venir s'installer. Pour les étudier nous avons eu recours aux mesures itinérantes qui permettent de multiplier les points de mesures et ainsi de mieux prendre en compte les effets microlocaux. En effet aux échelles fines, la relation entre les caractéristiques du milieu, la topographie et l'occupation du sol, crée une variabilité très localisée. En effet lorsque les conditions atmosphériques sont stables les effets microlocaux tels que les brises de pente apparaissent. L'utilisation du MNT (modèle numérique du terrain) nous aide à identifier et extraire l'orientation et la direction des pentes, pour caractériser le relief assez marqué dominant la ville et conditionnant les brises de jour comme de nuit.

Résultats des mesures itinérantes nocturnes (8 et 9 aout 2017)

La campagne de mesures itinérantes mesurant les données aérologiques a été menée dans plusieurs endroits de la zone d'étude. Les situations synoptiques générales en altitude et en surface la nuit du 8 et 9 aout 2017 étaient caractérisées par la présence le 8 septembre en altitude les hautes pressions subtropicales alors qu'en surface (fig. 5) la situation barométrique dessine un talweg thermique arabo-persique se prolongeant vers le Liban. Un ciel clair et dégagé était visible la nuit du 8 au 9 aout 2017.

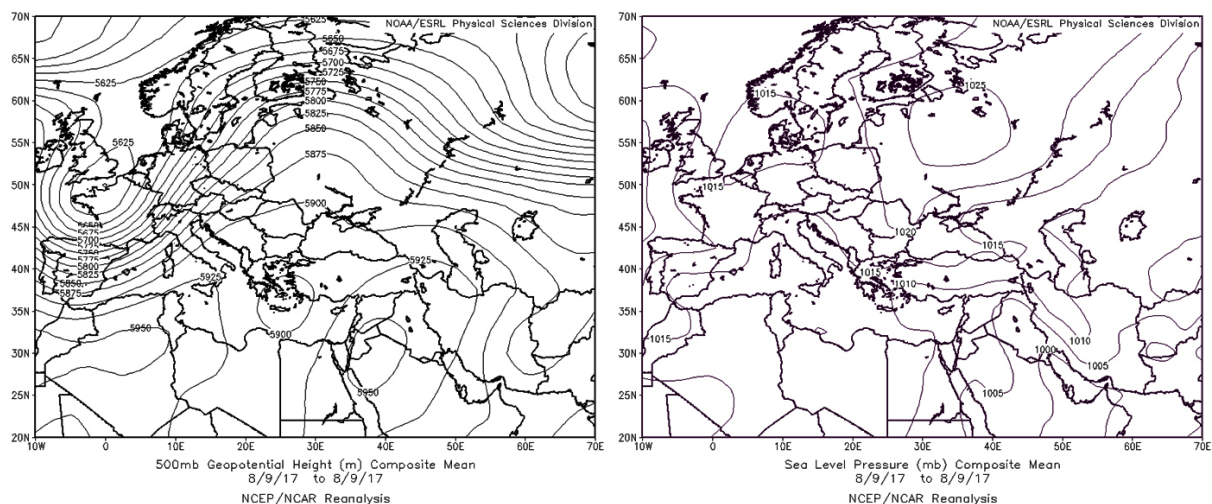


Fig. 5. Situation en altitude et en surface le 8/09/2017

Fig. 5. Situation at altitude and on the surface the 8/09/2017

Les mesures ont débuté vers les hauteurs de Mar Roukoz et Baabda ainsi que dans les principales vallées encaissées s'ouvrant sur la ville celle de Nahr Beyrouth et de Nahr el Mawt situées sur les versants Ouest du Mont Liban. Ensuite des mesures ont été réalisées à l'Est de la région d'étude vers le littoral (fig. 6). Le but de ces mesures était de vérifier l'existence des écoulements microlocaux liés à la topographie au niveau des vallées et de mettre en évidence l'existence des brises de terre.

Les conditions atmosphériques stables avec un ciel clair et un vent synoptique faible sont favorables à l'installation d'écoulement de pentes nocturnes (écoulements catabatiques). L'air plus froid que l'air ambiant, issu des déperditions énergétiques de la surface s'écoule par gravité au niveau du sol suivant les lignes de pente [Carrega, 1994]. Ces écoulements très localisés s'ajoutent à d'autres types d'écoulements comme les brises de vallée et peuvent compliquer l'aérodynamisme local.

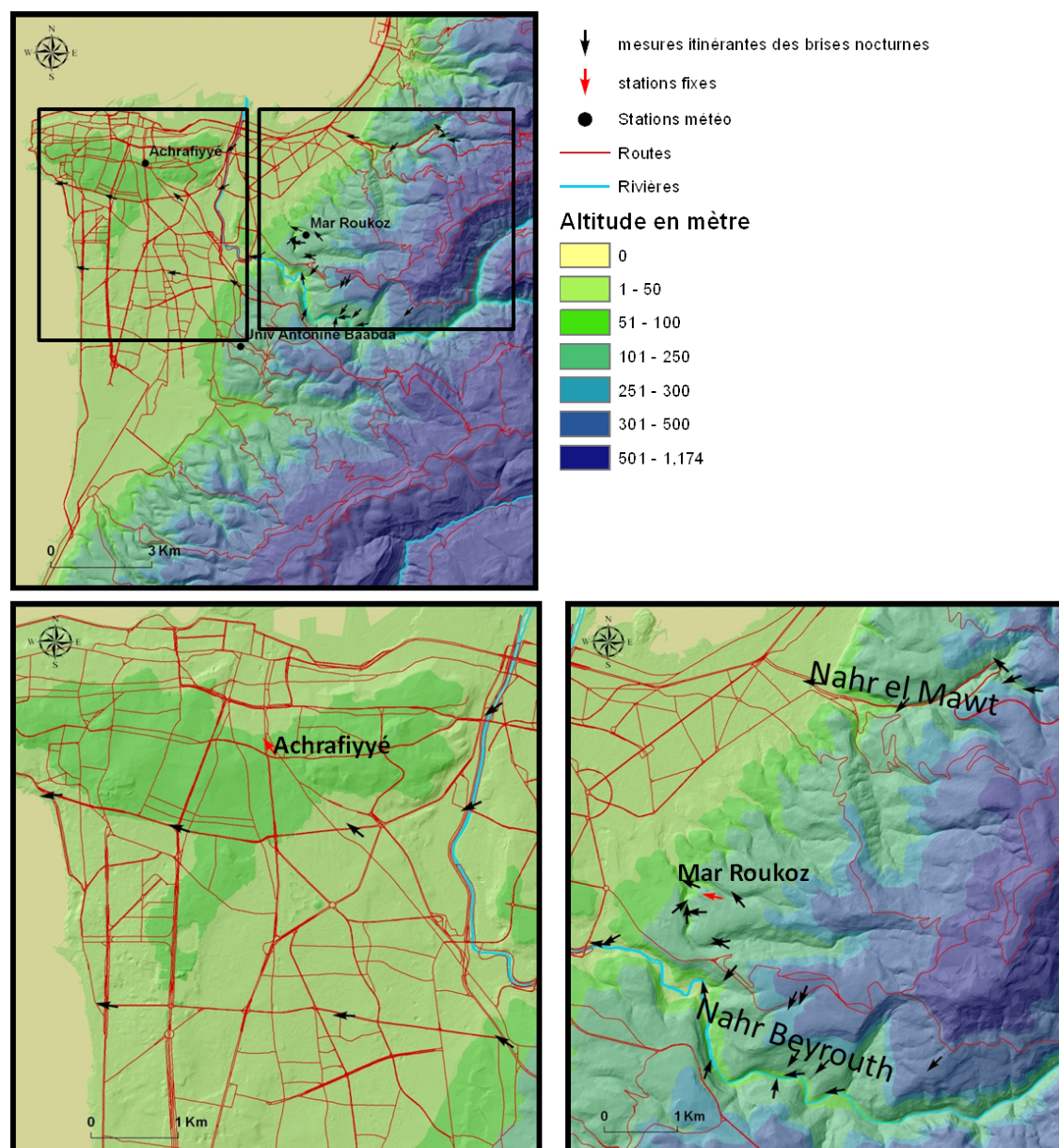


Fig. 6. Campagne de mesures itinérantes de brises nocturnes la nuit du 9 aout 2017

Fig. 6. Campaign of measurements with roving breezes night-the night of the 9th of August 2017

Mar Roukoz

Les mesures ont été réalisées à Mar Roukoz entre 00h00 et 01h30. Les mesures itinérantes effectuées avec une girouette ont mis en évidence l'existence d'un flux très léger variant en direction et en force conformément à la topographie du site.

Nahr Beyrouth

Les mesures itinérantes ont été réalisées dans la zone de Nahr Beyrouth entre 02h10 et 03h35 Cette vallée est caractérisée par des versants présentant des pentes très raides en amont. Les flux ont été détectés au fond de la vallée ainsi que sur ses versants. Ces enregistrements ont mis en évidence que cette partie était sous l'influence d'un système de brises de pente, relayant les flux canalisés au fond de vallée de Nahr Beyrouth vers l'aval (vers l'Ouest).

Nahr el Mawt

Les mesures itinérantes ont été réalisées dans la zone de Nahr el Mawt entre 04h15 et 05h00. Les résultats ont montré la présence d'un flux bien canalisé dans la vallée encaissée dans la chaîne du Mont-Liban, en plus de l'existence des brises de pentes enregistrées sur les versants.

Les brises de terre dans la ville

Entre 05h35 et 06h35 des mesures ont été prises sur les voies principales reliant les hauteurs à l'Est aux côtes à l'Ouest. Les mesures ont montrées l'existence des brises de terre de direction Est et Sud-Est sur deux des voies principales menant vers la côte. Nous pouvons constater l'importance de la topographie bien marquée de la chaîne montagneuse responsable de l'installation des brises nocturnes et des brises de terre qui s'impose sur la région arrivant à la côte.

Plusieurs phénomènes nocturnes intéressants ont été observés. L'existence des brises orographiques bien canalisées à Nahr Beyrouth et Nahr el Mawt. L'existence des brises de pente à partir du relief important. L'existence des brises de terre.

Résultats des mesures itinérantes diurnes le 9 aout 2017

La campagne de mesures itinérantes a été menée le 9 aout 2017 au cours de la période matinale. Les conditions synoptiques générales en altitude sont caractérisées par la présence des hautes pressions subtropicales au-dessus du Liban et de la Syrie et d'un champ de pression supérieur à 1010 hPa en surface au-dessus du Liban. Une stabilité est marquée ce jour-là, avec une humidité relative nocturne qui a évolué entre 65 % et 80 %. A 10 heures (heure locale) la station de l'AUB a enregistré une brise de mer de direction Ouest avec une vitesse de 3.6 m/s. Deux équipes ont menés les mesures de la direction et de la vitesse des brises au même moment à Nahr el Mawt et Nahr Beyrouth (fig. 7).

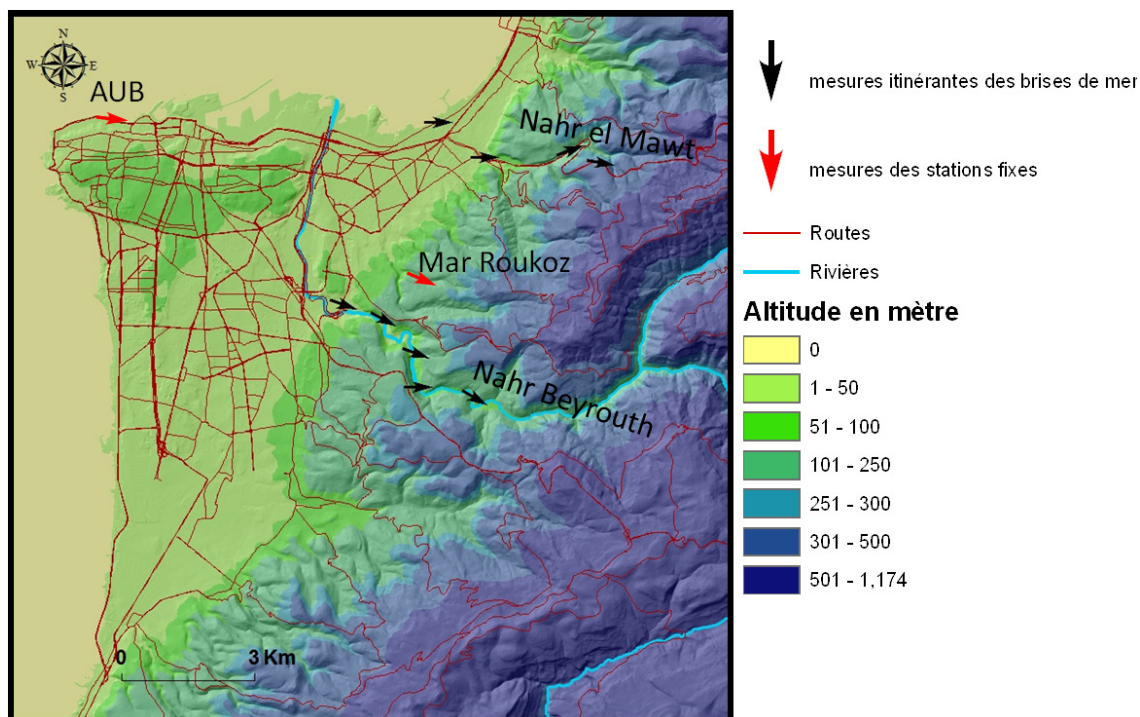


Fig. 7. Campagne de mesures itinérantes de la brise de mer dans les vallées principales de Beyrouth le 8/9/2017

Fig. 7. Measurement campaign travelling the sea breezes in the valleys in the key of Beirut the 8/9/2017

Deux heures après l'apparition de la brise de mer à la station de l'AUB la première équipe a commencé les mesures de direction et vitesse du vent près de la côte en direction de la vallée de Nahr el Mawt. Alors que la deuxième équipe enregistrait la direction et la vitesse du vent depuis l'aval du Nahr Beyrouth vers l'intérieur. Les données enregistrées par la première équipe à partir de la côte montrent une direction WNW avec une vitesse de 3 m/s. En aval de la vallée de Nahr el Mawt l'anémomètre enregistre la même direction avec une vitesse de 2 m/s inférieure à celle enregistrée près de la côte. Vers l'intérieur la brise est déviée vers le Sud-ouest et l'Ouest, la vitesse étant localement accélérée dans la vallée à 3m/s probablement par des effets de dynamique locale liés à l'échauffement important des versants par le rayonnement solaire. Comme l'air au-dessus de la surface se réchauffe par contact et s'élève le long des pentes, il donne naissance à un vent *ascendant* : la brise de vallée [Bridier, 2001; Quénot, 2002; Madelin, 2004]. Au même moment la deuxième équipe prenait des mesures dans la vallée de Nahr Beyrouth plus profonde et plus encaissée que celle de Nahr el Mawt. Une brise de direction Sud-ouest au Nord-ouest a été enregistrée au fond de la vallée avec une vitesse de 4 m/s en moyenne. Quand une plaine est fermée par des montagnes et coupée par une vallée importante, la brise de vallée se développe pendant que la brise de mer s'installe et, quand les deux se rejoignent, l'air marin est entraîné plus à l'intérieur en remontant la vallée [Janoueix-Yacono, 1995], avec une vitesse élevée en particulier quand la brise de mer est combinée à une brise de vallée ou de pente montante [Mahrer, Pielke, 1977; Alpert et al., 1982; Bastin et al., 2004].

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de vérifier et d'étudier si la topographie et l'occupation du sol pouvaient influencer les caractéristiques des brises aux échelles fines, de jour et de nuit. Le traitement des données acquises à partir du réseau de mesures a permis de mettre en évidence les caractéristiques des brises dans la zone d'étude.

Des campagnes itinérantes ponctuelles ont été menées afin d'étudier les brises de vallée nocturne et diurne. Les résultats ont montrés l'existence de plusieurs types de brises. Des brises de terre et de pentes ont été observées dans les reliefs accidentés au pied du Mont-Liban, ainsi que des flux canalisés dans les vallées de Nahr Beyrouth et de Nahr el Mawt.

L'ensemble des mesures, même s'il s'agit d'une campagne ponctuelle, confirme la relation étroite entre la topographie et la localisation des brises, alors que l'occupation du sol influence les vitesses d'écoulements en fonction de la rugosité de surface. Une analyse très détaillée du MNT et des cartes d'occupation du sol constitue donc un bon moyen d'identifier les caractéristiques théoriques de l'aérologie locale durant les situations radiatives, favorables à la stabilité atmosphérique et à la mise en place des brises thermiques.

REFERENCES

1. Alpert P., Cohen A., Doron E., Neumann J. A model simulation of a summer circulation from the eastern Mediterranean past Lake Kinneret in the Jordan valley. Monthly Weather Review. 1982. 110. P. 994–1006.
2. Bastin S., Drobinski P., Delville P. et al. Impact of the Rhône and Durance valleys on sea-breeze circulation in the Marseille area. Atmospheric Research. 2004. V. 74. P. 303–328.
3. Beltrando G. Dictionnaire du climat. Edit. LAROUSSE, 1995. 344 p.
4. Beltrando G., Chemery L. Dictionnaire du climat. Édité. LAROUSSE, 1995. 344 p.
5. Bridier S. Modélisation de la répartition des brises et des températures en situation radiative. Thèse de doctorat, Université de Paris 7, 2001. 185 p.
6. Carrega P. Vent et échelles de contraintes géographiques: exemples en région niçoise. Publications de l'Association Internationale de Climatologie. 1989. V. 2. P. 309–316.

7. *Carrega P.* Topoclimatologie et habitat. Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée, Thèse d'Etat, 1999. V. 35 et 36. 408 p.
8. *Janouex-Yacono D.* Rapports entre brise de mer ou de lac, structure de la couche limite planétaire et pollution atmosphérique sur des plaines littorales urbanisées. GDR Climat et santé. 1995. P. 177–201.
9. *Madelin M.* L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne: modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements d'air. Thèse, Université Paris 7, 2004. 412 p.
10. *Mahrer Y., Pielke R-A.* The effects of topography on sea and land breezes in a two dimensional numerical model. Mon. Wea. Rev. 1977. V. 105. P. 1151–1162.
11. *Pedelaborde P.* Sur les brises. Met Mar. 1987. N 136. P. 11–15.
12. *Quenol H.* Climatologie appliquée aux échelles fines: l'exemple de l'impact d'un remblai ferroviaire et des haies brise-vent sur le gel printanier et sur l'écoulement du mistral dans la basse vallée de la Durance. Thèse, Université de Lille 1, 2002. 284 p.

Васильев П.В.¹, Чистов С.В.², Криксунов Е.А.³, Бобырев А.Е.⁴

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ РЫБ ПСКОВСКОГО ОЗЕРА

АННОТАЦИЯ

В статье авторы излагают экспериментальную методику построения серии карт численности промысловых видов рыб на основе данных их траловых учетов в акватории Псковского озера. За последние полтора десятка лет для линий траления помимо параметров ресурсного и гидролого-климатического характера стали фиксировать еще и координаты начальной и конечной точек, что создало предпосылки для разработки серии картографических моделей.

На основе специализированного ГИС-проекта выполнено картографическое моделирование пространственно-временной динамики ряда видов рыб в акватории Псковского озера за 2003, 2006 и 2008 гг., различающиеся режимом водности. В результате впервые выполнена попытка определения связей между распределением в различные сезоны года видов ихтиофауны (присутствовавших в составе улова экспериментального трала: окунь, лещ, судак, плотва, щука, ерш, густера) и градиентами гидрологических факторов (температура, водность, глубина), влияющими на поведение и перемещения рыб.

По результатам картографирования в акватории озера выявлены и оценены зоны высокой продуктивности ихтиофауны как по отдельным промысловым видам, так и по их комплексам, а также дана оценка эколого-географических параметров, определяющих акватории различной продуктивности с учетом сезонной ритмики и тенденции изменений состава улова на протяжении последних лет. Установлено, что для разных видов рыб связь плотности скоплений с гидрологическими условиями не выражена, максимальные и минимальные значения плотности для каждого из видов, в достаточном количестве присутствующих в уловах экспериментального трала, фиксируются при разных параметрах водности, температуры и глубины. Авторы предполагают, что включение в анализ других факторов (в том числе гидрохимических и гидробиологических) позволит уточнить причины, определяющие пространственно-временную динамику каждого из исследуемых видов.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения картографического метода в изучении пространственно-временных особенностей формирования биопродуктивности экосистем внутренних водоемов. Дополнительное привлечение данных натурных измерений, мониторинговых наблюдений и аэрокосмических исследований (как дополнительных источников информации о состоянии водной среды) позволит существенно расширить возможности комплексного изучения динамических режимов как отдельных компонентов экосистемы водоема, так и биотического сообщества в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: картография, моделирование, динамика популяций, рыбы, Псковское озеро.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: yadrpaul1993@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: svchistov@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: kriksunov@mail.ru

⁴ Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова, Ленинский проспект, д. 33, 119071, Москва, Россия, e-mail: abobyrev@mail.ru

Pavel V. Vasilev¹, Sergey V. Chistov², Evgenyi A. Kriksunov³, Alexander E. Bobyrev⁴

CARTOGRAPHIC MODELING OF SPATIAL-TEMPORAL DYNAMICS OF FISH POPULATIONS FROM PSKOV LAKE

ABSTRACT

An experimental methodology is designed for map series construction where maps represent the abundance of commercial fish species in Pskov Lake estimated using data from trawl surveys. Over the last 15 years, for each survey (which are usually conducted in the first or the second half of vegetation season), vessel coordinates at the starting and ending points of linear trawling transects are registered as a vessel tows a trawl with given velocity.

Cartographic modeling of spatial-temporal dynamics of several fish species from Pskov Lake has been conducted on the basis of the specialized GIS-project. Considered are 2003, 2006, and 2008 years, which differ in water discharge level. Given the resulting data, an attempt has been made to reveal the relationships between fish spatial distribution (of those species present in experimental trawl catch: perch, bream, zander, roach, pike, ruff, and white bream) and gradients of those factors influencing their behavior and movements (temperature, water level, depth). The estimates of fish population density in different lake zones are obtained, and the size of areas with different density of fish aggregations is calculated. For instance, in 2003 (which is characterized by medium water discharge level) fish aggregations of high density occupied an area of 28.57 km², in 2006 (low water discharge) – only 12.46 km², while in 2008 (high water discharge) – 56.41 km². In addition, the contingency in spatial distribution of fish species connected by "predator-prey" relations is analyzed.

By the results of approbation of the mapping technique developed, the following patterns are revealed in forming of water areas with high fish density: 1. In high-water years, the density of fish aggregations increase as well as the total area occupied by them. In such years, aggregations are formed in the central part of the lake. In low-water years they shift towards coastal areas including river mouths and deltas. 2. In Pskov Lake, the predominant depth of those areas occupied by fish aggregations is about 4.1–4.6 m. With water level increasing, dense aggregations move to areas of greater depth. 3. Fish aggregations predominantly form on those areas where surface water temperature is approximately equal to or lower than mean overall value.

For some fish species, the relationships between aggregations density and hydrological conditions are not detectable, probably because of few hydrological or hydrochemical traits included in the analysis. It is to be expected that introducing more data of monitoring observations along with data from remote sensing (as additional source of information on aquatic conditions) would significantly expand the possibilities for complex studies of dynamic regimes of separate ecosystem components as well as the lake biotic community as a whole.

KEYWORDS: cartography, modeling, population dynamics, fish, Pskov Lake.

ВВЕДЕНИЕ

Псковско-Чудское озеро, расположенное на границе между Эстонией и Россией, относится к наиболее продуктивным внутренним водоемам северной Европы. В целом озеро представляет собой систему из трех связанных между собой озер: Чудского,

¹ Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia, e-mail: yadrpaul1993@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia, e-mail: svchistov@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia, e-mail: kriksunov@mail.ru

⁴ A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, 33 Leninskij prosp., 119071, Moscow, Russia, e-mail: abobyrev@mail.ru

Псковского и Теплового. Их общая площадь составляет 3555 км², средняя глубина – 7,1 м, наибольшая – 15,3 м [Nögesetal, 1996].

В составе ихтиофауны Псковско-Чудского озера насчитывается 36 видов рыб [Lammensetal, 2007], из которых 23 имеют промысловое значение [Nögesetal, 1996]. К массовым и наиболее значимым в промысловом и экологическом отношении видам относятся снеток, лещ, окунь, судак, плотва, ряпушка, сиг и др.

Рыбохозяйственные и экологические исследования Псковско-Чудского водоема имеют длительную историю [Kanguretal, 2001]. К настоящему времени накоплены значительные объемы данных, используемые в модельном анализе особенностей промысловой эксплуатации отдельных наиболее важных видов биоресурсов, а также для интерпретации общих свойств биотического сообщества озера, процессов формирования его биологической продукции и той ее части, которая вовлекается в хозяйственный оборот [Bobyrevetal, 2013].

Используемые при этом подходы отличаются тем общим свойством, что моделируемые системы, будь то отдельные популяции или биотическое сообщество водоема в целом, рассматриваются как точечные объекты. Их исчерпывающими характеристиками являются усредненные показатели обилия, массы организмов, их темпов роста и отмирания или усредненные оценки удельного потребления, продукции, состава пищевых рационов и др. За рамками рассмотрения остается фактор пространства, который играет важную роль в динамике биотических взаимоотношений организмов или их отношений с абиотическими компонентами среды обитания. Очевидно, что при одной и той же средней концентрации локальные плотности рыб могут существенно различаться, внося искажения в рассчитанные для средних уровней результаты межвидовых взаимодействий, популяционные или экосистемные изменения.

Пространственная и экологическая неоднородность – характерная особенность организации экосистемы Псковско-Чудского озера. Она проистекает из особенностей его географического положения, морфометрии, особенностей питания и т. д. С севера на юг озеро протянулось примерно на 135 км, с запада на восток – около 50 км в самом широком месте. При этом три части озера, Псковское, Теплое и Чудское, отделены друг от друга узкими проливами (пролив между Теплым и Псковским – около 4 км, между Теплым и Чудским – 1,75 км), что определяет своеобразие условий в каждом из этих озер.

В последние годы в связи с развитием геоинформационных систем произошли важные изменения в применении методологии пространственного анализа для фаунистических данных. В случае рыбных ресурсов учет фактора пространства может иметь большое значение, в том числе для целей управления промыслом. Не случайно, что все большее число национальных и международных экспериментальных исследований, охватывающих важные промысловые районы, проводятся с помощью включения геоинформационных подходов в общие модели теории рыболовства, интерпретирующие изменения запасов под действием промысла [Relini, 1985; Ardizzone, 1994; Relini, Piccinetti, 1994; Corsi, 2000; Steenbeeketal, 2013].

Настоящая работа посвящена изучению пространственно-временной динамики рыб Псковского озера. Исследование носит подготовительный и во многом методический характер. Оно направлено на выявление характерных черт в картине пространственного распределения различных видов рыб в разные сезоны вегетационного периода. Его конечной целью является разработка общей модели популяционных изменений рыб и динамики биотического сообщества Псковско-Чудского озера, включающей пространственное измерение.

Внимание к ихтиологическим объектам в данной работе определяется тем, что из всех видов гидробионтов рыбы являются объектами, максимально обеспеченными информацией, полученной из анализа результатов промыслово-биологического мониторинга, используемой в расчетах демографических параметров и популяционных процессов. Данные о сезонных перемещениях рыб крупных озер фрагментарны. Большей частью они относятся к периодам образования преднерестовых и нерестовых скоплений в районах, где исторически размещаются основные виды промысла. Полные знания о картинах пространственного распределения различных видов рыб в озерных экосистемах и факторах, их контролирующих, практически отсутствуют.

Псковское отделение Государственного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства им. Л.С. Берга (ГосНИОРХ) с 1999 г. проводит траловые учеты рыб в акваториях Псковского и Чудского озер. Результаты таких учетов, проводимых в начале вегетационного периода и второй его половине, использованы в качестве исходных данных настоящей работы. Их анализ требует привлечения современных подходов, основанных на использовании методов, способных оперировать множеством переменных. К таким методам относятся, в частности, геоинформационные технологии и математико-картографическое моделирование. Авторы считают, что реализация таких подходов существенно повысит эффективность анализа накопленных к настоящему времени данных, даст объективную картину особенностей распределения рыб в разные сезоны года, позволит определить главные факторы пространственно-временной динамики отдельных видов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Базисом для информационного обеспечения работ послужили данные многолетних натурных обследований продуктивности промысловых видов рыб Псковско-Чудского озерного комплекса методом траления. Работы выполнены Псковским отделением ГосНИОРХ, сотрудники которого предоставили материалы статистики.

Для отработки методики авторами были собраны и структурированы данные статистики за период 1999–2011 гг., относящейся к главным промысловым видам рыб. Исследованы семь основных представителей ихтиофауны, представляющих наибольший интерес в плане изучения особенностей их пространственно-временного распределения: окунь, лещ, судак, плотва, щука, ерш и густера.

Эти виды можно подразделить на категории хищников и «жертв» по преобладающему типу питания. Ведущими преимущественно хищническими видами являются окунь, судак и щука. Питающимися, в основном, фито- и зоопланктоном, мелкими ракообразными и моллюсками и выступающими чаще всего в качестве «жертв» (объектов питания хищников) видами являются лещ, густера, плотва и ерш.

Исходные данные траловых съемок в общем случае включают следующую информацию:

- 1) номер (обозначение) траления;
- 2) координаты начальной и конечной точек траления;
- 3) дата и время начала и окончания траления;
- 4) скорость траления;
- 5) температура воды во время траления;
- 6) вылов по отдельным видам рыб и размерам (длине) экземпляров;
- 7) примечания.

Особенно важным является наличие у данных тралового учета позиционной составляющей – координат начальной и конечной точек траления, что позволяет исследовать пространственно-временные особенности формирования продукции промысловых видов рыб и биопродуктивности озера в отдельных его акваториях.

Для выбранного массива данных была проведена классификация с учетом степени подробности и структурированности исходной информации, как для всего массива отмеченных лет, так и для сезонов траления. В результате по степени информативности траловых съемок были выделены три класса лет, для которых характерны:

- 1) высокая информативность – результаты содержат данные по 5 и более видам, в том числе по 2 и более «жертвам»;
- 2) средняя информативность – результаты содержат данные по 4, в том числе 1 «жертве»;
- 3) низкая информативность – результаты содержат данные по 3 и менее видам без «жертв».

Были выделены три года с высокой информативностью как минимум за два сезона (I – весна/начало лета; II – осень): 2003, 2006 и 2008 гг. Эти данные послужили основой для отработки методики картографирования пространственно-временного распределения основных промысловых видов рыб на основе специально созданного ГИС-проекта.

Известно, что разные виды промысловых рыб имеют специфические требования к условиям обитания по сезонам года. В этом отношении возникла необходимость изучения гидролого-климатических особенностей не только водоема, но и бассейна р. Великой, в котором преимущественно формируется водный режим всей Псковско-Чудской системы проточных озер. Поэтому в исследовании помимо статистики о биопродуктивности озера были собраны данные о некоторых гидролого-климатических факторах, влияющих на демографические популяционные параметры массовых видов рыб водоема.

Ниже всего по течению из всех действующих на р. Великой гидрологических постов, а значит, и наиболее близко к самому Псковскому озеру расположен пункт наблюдений в г. Пскове. Из всех гидрологических характеристик, фиксируемых на этом посту, с величиной расхода взвешенных наносов, который играет значительную роль в формировании биопродуктивности озерных экосистем, более всего связан уровень воды. По взятым из «Информационной системы по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России» [Информационная система..., 2014] исходным данным были составлены графики хода уровня воды в р. Великой в створе гидрологического поста г. Пскова относительно нуля графика поста для 2003, 2006 и 2008 гг.

На основе сравнительного анализа полученных графиков эти годы с высокой информативностью траловых учетов были разделены по относительной водности: 2003 – средневодный, 2006 – маловодный, 2008 – многоводный год. Материалы шести траловых съемок, проведенных в эти годы (по две съемки в год), были использованы в качестве модельных (эталонных), для которых отрабатывалась единая методика картографического моделирования. Подробная технологическая схема методики и ее описание изложены авторами ранее [Васильев, Чистов, 2017], а на рис. 1 приведена обобщенная схема основных этапов работ.

На первом этапе выполнялась предварительная обработка данных: структурирование, формализация, перевод в цифровой векторный формат (в частности, построение по координатам начальных и конечных точек самих линий траления и выделение средних точек этих линий как исходных для последующей интерполяции) и выделение границ исследуемой акватории.

С целью выбора из наиболее распространенных в ГИС-пакетах методов интерполяции наиболее приемлемого не только с математической, но и с географической точки зрения было проведено пробное моделирование. В качестве тестовых были взяты данные по вылову плотвы в ходе траловой съемки, проводившейся на Псковском озере 25–26 октября 2008 г. На основе этих данных разными методами было построено пять моделей (рис. 2) пространственного распределения продуктивности этого вида в акватории озера. Тестировались следующие методы интерполяции:

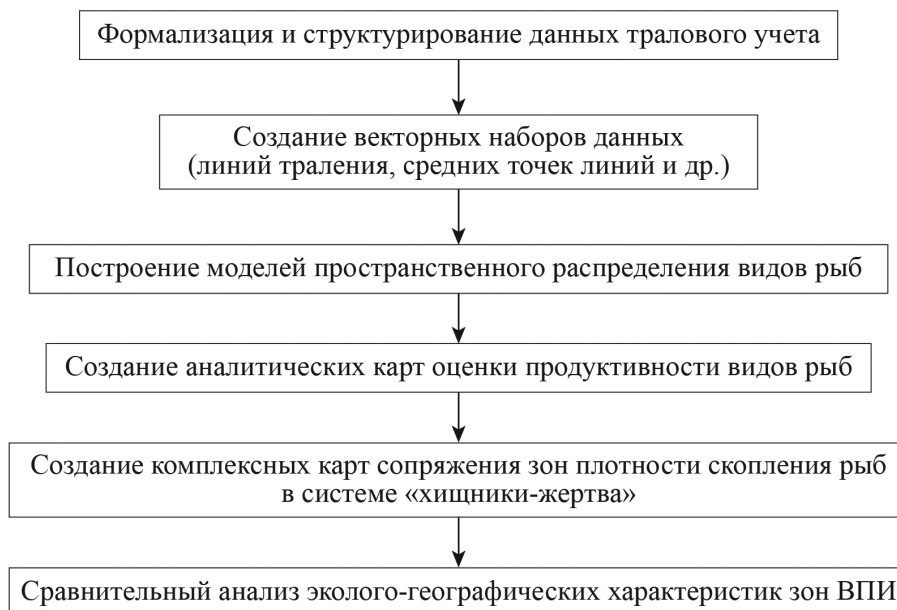


Рис. 1. Схема методики картографического моделирования
пространственно-временной динамики популяций рыб
Fig. 1. Scheme of methods for cartographic modeling
of spatial-temporal dynamics of fish populations

- 1) метод обратно взвешенных расстояний (ОВР) (рис. 2, а);
- 2) метод естественной окрестности (рис. 2, б);
- 3) метод полиномиального тренда 2-й степени (рис. 2, в);
- 4) метод полиномиального тренда 3-й степени (рис. 2, г);
- 5) метод сплайнов с натяжением (рис. 2, д).

Как видно из рис. 2, наиболее правдоподобным, достоверным, соответствующим традиционным для географии и картографии представлениям о плавном и непрерывном рисунке изолиний как реальных, так и абстрактных геополей является результат моделирования, полученный с использованием метода сплайнов с натяжением (рис. 2, д). В связи с этим именно он был выбран в качестве метода интерполяции исходных данных в рамках настоящей методики.

Далее осуществлялось построение моделей пространственного распределения каждого из семи видов рыб в периоды проведения соответствующих траловых съемок посредством интерполяции по выбранному методу. Затем была проведена классификация полученных растровых моделей по методу равных интервалов (для показателя плотности скопления) и по методу квантилей (для выделения зон с высокой, средней и низкой плотностью). В результате было составлено 38 аналитических карт оценки продуктивности видов рыб. Примеры таких карт для продуктивности судака (хищника) и плотвы («жертвы») в мае 2003 г. представлены на рис. 3.

На основе полученных аналитических карт посредством графического и топологического оверлея затем составлялись комплексные карты сопряжения (соответствия в пространстве) зон плотности скопления рыб в системе «хищники – жертва». Для картографирования были выбраны наиболее типичные представители этих звеньев трофической сети среди основных видов рыб, обитающих в Псковском озере: окунь, судак и щука – как хищники, плотва – как «жертва». Всего составлено шесть комплексных карт. Пример одной из этих карт приведен на рис. 4.

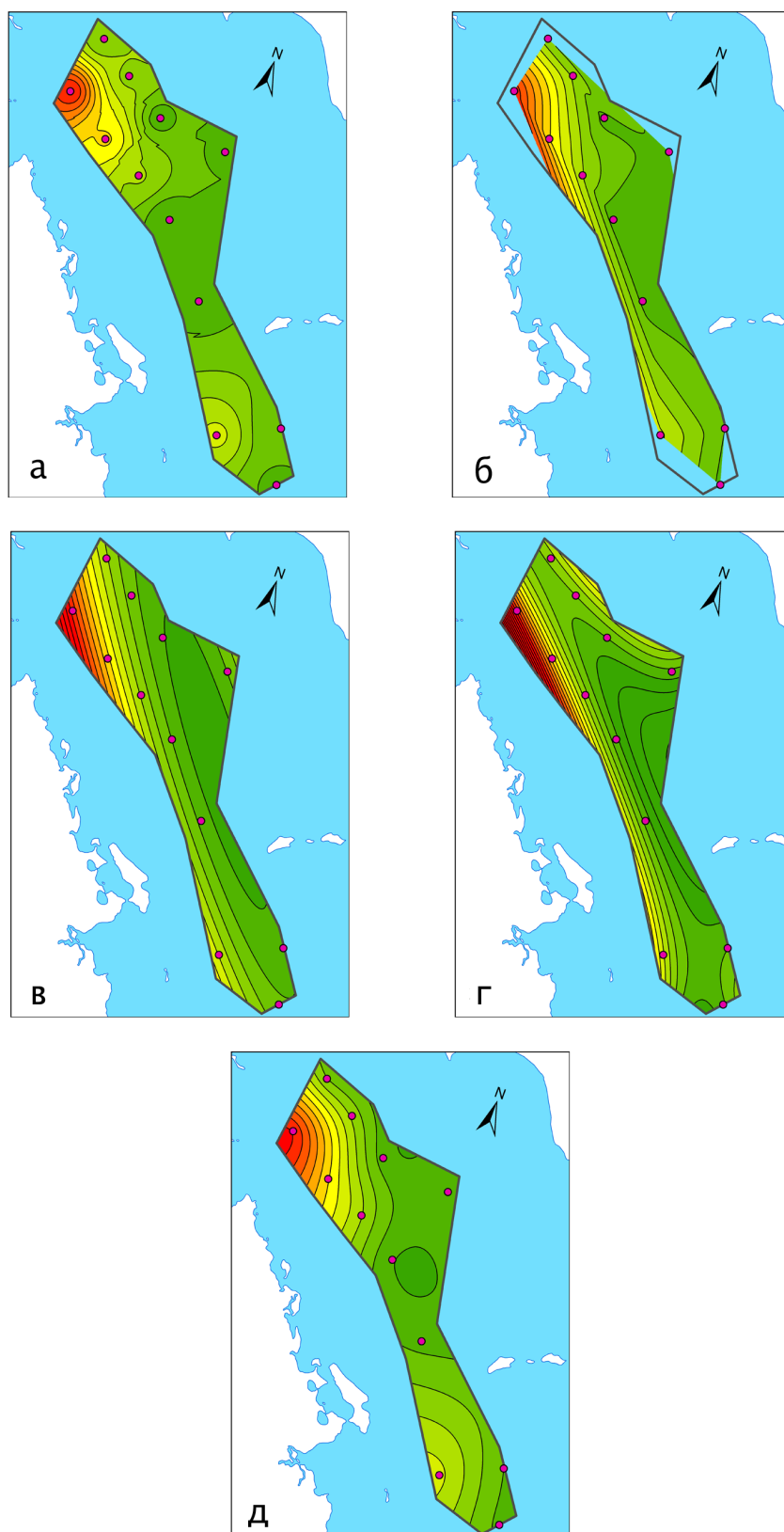


Рис. 2. Сравнение результатов тестирования методов интерполяции
(пунсонами показаны исходные точки для моделирования)
Fig. 2. Comparison of the results of testing interpolation methods
(initial points for modeling are shown by markers)

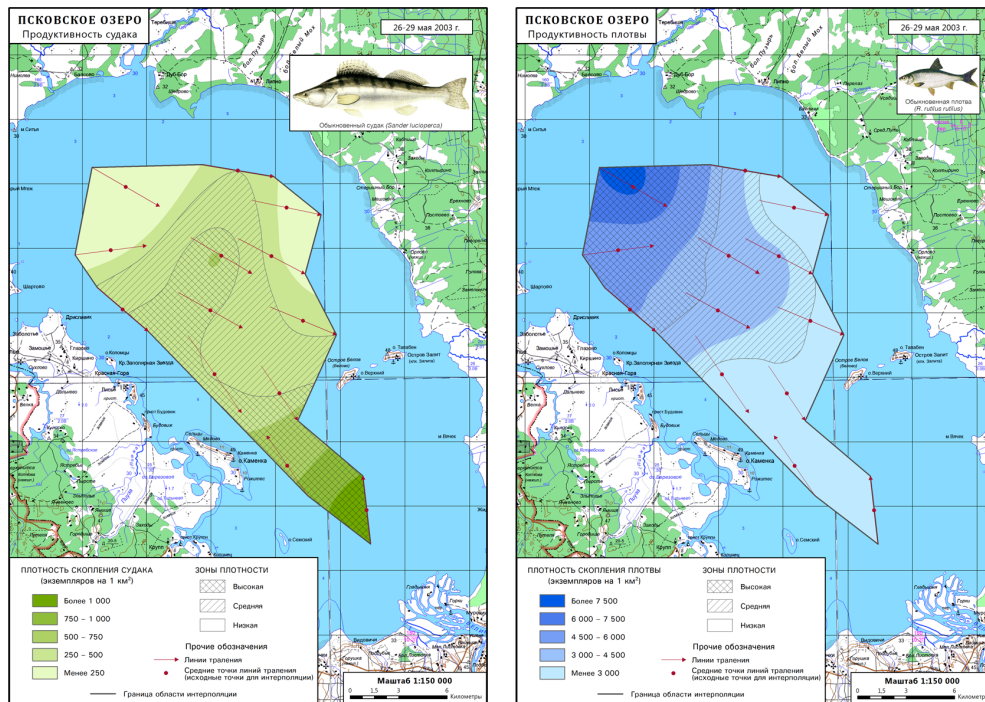


Рис. 3. Примеры аналитических карт оценки продуктивности видов рыб
Fig. 3. Examples of analytical maps with assessment the productivity of fish species

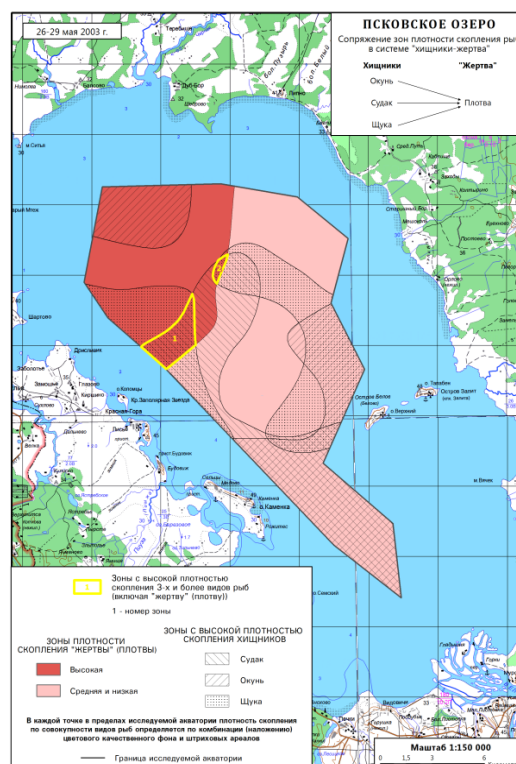


Рис. 4. Пример комплексной карты сопряжения зон плотности скопления рыб в системе «хищники – жертва»
Fig. 4. Example of complex map with spatial match of fish density zones in the "predators-prey" system

По результатам комплексного картографирования были также отдельно выделены зоны с высокой плотностью скопления трех и более видов рыб, включая «жертву» – плотву, как участки, потенциально обладающие наиболее благоприятными условиями для высокой продуктивности ихтиофауны (ВПИ). В общей сложности было выявлено восемь таких зон в периоды проведения траловых съемок.

На заключительном этапе проводился сравнительный анализ выявленных зон ВПИ по совокупности следующих эколого-географических характеристик:

- 1) местоположение зоны в акватории озера;
- 2) плотность скопления видов рыб (хищников и «жертвы»);
- 3) характеристика эталонного года по степени водности (маловодный, средневодный или многоводный);
- 4) уровень воды в период проведения траловой съемки на постах: о. Залита (Псковское озеро) и г. Псков (р. Великая);
- 5) температура воды у поверхности;
- 6) глубина;
- 7) площадь зоны, а также суммарная площадь зон за период проведения траловой съемки и суммарная площадь выявленных зон за эталонный год.

В результате анализа были выявлены важные особенности в формировании зон с высокой продуктивностью ихтиофауны, связанные, прежде всего, с гидрологическими условиями.

Авторами также проводились эксперименты по повышению географической и картографической достоверности моделирования пространственного распределения видов рыб. В частности, была разработана методика построения границы области интерполяции на основе статистического анализа распределения глубин.

Глубина является одним из ключевых факторов, определяющих условия обитания водного населения и, в частности, ихтиофауны в водоемах [Методика..., 1975]. В связи с этим границей области интерполяции вполне обоснованно могут служить линии равных глубин – изобаты.

На первом этапе методики строится предварительная растровая модель пространственного распределения одного из видов рыб, учтенных в траловой съемке. Областью интерполяции при этом служит полигон, образуемый начальными и конечными точками линий траления, соединенными отрезками прямых линий (в топографической проекции) по принципу, аналогичному методу построения выпуклой оболочки.

Далее для каждой ячейки раstra полученной модели определяется соответствующая ее плановому положению глубина по имеющейся цифровой модели рельефа (ЦМР) дна озера. Для результирующего массива значений глубин затем проводится статистический анализ на основе методики, предложенной Ю.Г. Симоновым [Симонов, 1998]:

1. Ранжированный в порядке возрастания исходный ряд значений глубин разбивается на разряды, соответствующие интервалу глубин в 0,1 м.
2. Вычисляются общие характеристики для всего массива значений: среднее арифметическое, среднее квадратическое отклонение, их ошибки и коэффициент вариации.
3. Вычисляются статистические показатели для каждого разряда: центр, частота встречаемости значений, вероятность и др.
4. Строятся гистограмма и график кривой функции распределения.
5. Определяется величина, «отсекающая» разряды минимальных значений глубин по критерию 95–98 % вероятности, исходя из полученных статистических показателей, гистограммы и графика.

Найденное значение, таким образом, является нижней границей интервала наиболее часто встречающихся глубин в пределах общей области проведения данной траловой съемки. Иными

словами, изобаты, соответствующие этой глубине, ограничивают ту часть акватории, к которой может быть отнесен основной массив результатов траловой съемки. Следовательно, эти изобаты могут служить границей области интерполяции при моделировании пространственного распределения видов рыб уже с учетом соблюдения его географической достоверности.

Искомые изобаты сначала строятся по ЦМР дна, а затем для целей картографирования и последующих анализа и оценки модифицируются: короткие – исключаются, угловатые участки – сглаживаются.

Полученный набор полигонов с границами из модифицированных изобат является целевой областью интерполяции, в пределах которой в дальнейшем возможно построение итоговых географически и картографически достоверных моделей пространственного распределения видов рыб.

На рис. 5 в качестве примера представлена карта оценки продуктивности судака в Псковском озере по данным траловой съемки, проводившейся в мае 2003 г.

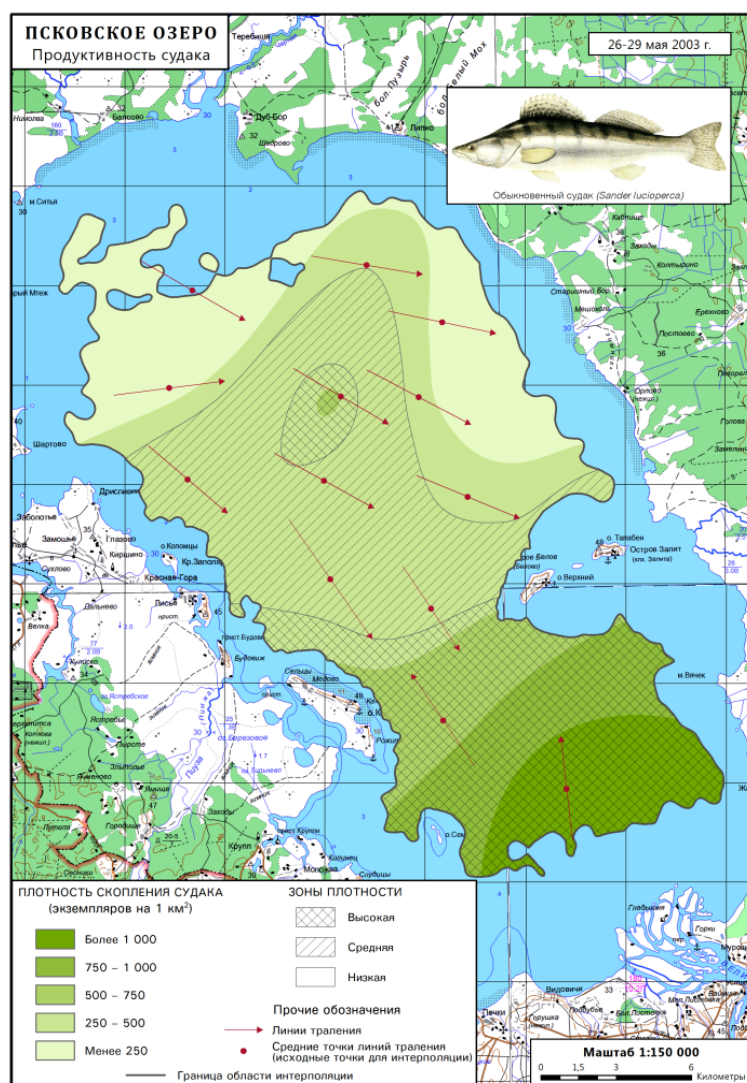


Рис. 5. Пример карты оценки продуктивности судака, составленной с использованием в качестве границы области интерполяции контура, полученного на основе статистического анализа распределения глубин

Fig. 5. Example of map with assessment of zander productivity, made by using boundary obtained from statistical analysis of depth distribution as the interpolation area contour

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе особенностей пространственно-временной динамики рыб учитывалось два основных гидрологических параметра – глубина и температура воды у поверхности. Для более точного и достоверного определения глубин в пределах выявленных зон скоплений рыб построена ЦМР дна всего Псковско-Чудского озерного комплекса и составлены соответствующие карты. Определение температуры воды в периоды проведения траловых съемок осуществлялось в несколько этапов. Сначала по средним точкам линий траления выполнялось построение моделей распределения температуры, измеряемой в ходе съемок и представленной в траловых журналах. Затем по тому же принципу, что и в случае с плотностью скопления видов рыб, по полученным растровым моделям рассчитывалась зональная статистика.

Анализ комплексных карт, учитывающих пространственные сопряжения зон в распределении видов рыб, относящихся к хищным (судак, окунь, щука) и мирным (плотва) рыбам, карт температуры воды и рельефа дна дает следующие результаты.

В 2003 г., который был определен как год с относительно средней водностью среди эталонных лет, в периоды проведения траловых съемок формировалось три зоны плотных скоплений рыб, представленных одновременно хищными и мирными видами: две – № 1 и 2 – с 26 по 29 мая и одна – № 3 – с 28 по 30 октября.

Зона № 1, большая из двух по площади (5,55 км²), находилась ближе к западному берегу озера на участке с глубинами от 4,5 до 4,8 м и температурой воды у поверхности от 16,5 до 16,7 °С (в среднем 16,6 °С). Зона № 2 располагалась в центре озера к северо-востоку от 1-й на участке с глубинами от 4,5 до 4,7 м (в среднем 4,6 м) и температурой воды у поверхности на тот период 16,7 °С.

Зона высокой плотности, отмеченная для периода 28–30 октября 2003 г., имела площадь 22,4 км² и находилась в крайней северо-западной части исследуемой акватории, ближе к проливу, соединяющему Псковское озеро с Теплым. Средние значения плотности рыб в этой зоне составляли: для судака – 2010 экз./км², окуня – 2464 экз./км², щуки – 800 экз./км² (наибольшая среди выявленных зон), плотвы – 2575 экз./км². Глубина в пределах зоны менялась в диапазоне от 1,9 до 5 м, в среднем составляя 4,1 м. Температура воды в ходе траловой съемки 28–30 октября 2003 г. не измерялась. В целом общая площадь выявленных за средневодный 2003 г. зон с высокой плотностью скопления рыб равна 28,57 км².

В 2006 г. (малой водности) формировалась лишь одна зона высокой плотности рыб, приходящаяся на период 21–24 августа. Она располагалась в крайней юго-восточной части озера, на расстоянии немногим более 3 км от авандельты р. Великой, и имела площадь 12,46 км². Средние значения плотности отдельных видов составляли: для судака – 2493 экз./км², окуня – 4382 экз./км², щуки – 166 экз./км², плотвы – 7347 экз./км². Глубины на этом участке варьировали от 3,8 до 4,3 м (в среднем 4,1 м), температура воды у поверхности – от 20,1 до 20,4 °С (в среднем 20,2 °С). Площадь единственной выявленной за маловодный 2006 г. зоны скопления рыб составила 12,46 км².

В 2008 г. (среди эталонных год с относительно большой водностью) зарегистрировано сразу четыре зоны высокой плотности рыб: № 1 – с 9 по 11 июня и № 2, 3 и 4 – с 25 по 26 октября.

Обширная, вытянутая с севера на юг зона № 1 фиксировалась в центральной части акватории озера между островами Каменка и Верхний. Она имела максимальную среди всех площадь – 24,95 км². В этом скоплении доминировали три вида рыб: судак (в среднем 1632 экз./км²), окунь (3441 экз./км²) и плотва (11 033 экз./км²). Зона располагалась на участке с глубинами от 4,4 до 4,8 м (в среднем 4,6 м), с температурами воды у поверхности 17,5–17,7 °С (в среднем 17,6 °С).

Три зоны с высокой плотностью скопления рыб (№ 2, 3 и 4), формировавшиеся в период проведения траловой съемки 25–26 октября 2008 г., в совокупности имели площадь 31,46 км². Первые две (№ 2, 3) располагались в северо-западной части исследуемой акватории на расстоянии 500–600 м друг от друга, но при этом различались по соотношению и составу видов. Площадь зоны № 1, находившейся северо-западнее зоны № 2, составила 3,05 км². Площадь зоны № 2 – 22,05 км²; состав и обилие зарегистрированных здесь видов следующие: судак – 1250 экз./км², окунь – 5892 экз./км², щука – 229 экз./км², плотва – 84021 экз./км². Обе зоны располагались на участках с глубинами от 3,6 до 5 м (в среднем 4,1 м) и температурой воды у поверхности на тот период от 7,64 до 7,9 °С (в среднем 7,7 °С). Зона № 3 находилась в юго-восточной части исследуемого участка акватории и имела площадь 6,36 км². В ее пределах отмечалась высокая плотность окуня, щуки и плотвы, судак отсутствовал. Глубины этой зоны варьировали от 4,2 до 4,5 м (в среднем 4,3 м) и температура воды у поверхности – от 7,6 до 7,8 °С (в среднем 7,7 °С). В целом суммарная площадь выявленных за многоводный 2008 г. зон с высокой плотностью скопления рыб составляет 56,41 км², что является наибольшим значением для выбранных эталонных лет.

К сожалению, использование ограниченного числа переменных, характеризующих условия гидрологического режима на отдельных участках акватории Псковского озера, не позволяет выделить связь между показателями среды и процессами формирования скоплений рыб разного вида. Максимальные и минимальные значения плотности для четырех рассматриваемых видов регистрируются при совершенно разных параметрах водности, температуры и глубины, что, впрочем, не удивительно, если учитывать сложные механизмы поведения рыб и множество факторов, оказывающих влияние на динамику их популяций. Тем не менее нам представляется, что геоинформационные методы являются одним из немногих инструментов, способных эффективно решать биоэкологические задачи по анализу связи между организмами и распределенными в пространстве элементами, процессами и явлениями. Одним из условий этого представляется наличие необходимой статистики, позволяющей вовлекать в анализ различные показатели, отражающие не только гидрологические, но и гидрохимические, экологические и биологические особенности, влияющие на поведение и перемещения рыб.

ВЫВОДЫ

По итогам апробации разработанной методики для выбранных эталонных лет выявлены следующие особенности в формировании зон высокой плотности рыб:

1. В многоводные годы суммарная площадь зон скоплений рыб и плотность этих скоплений возрастают. В эти годы зоны скоплений формируются в центральной части Псковского озера. В маловодные годы они смещаются к береговым участкам, в том числе к устьям и дельтам впадающих в озеро рек.

2. В акватории Псковского озера преобладающие глубины в зонах скоплений рыб составляют 4,1–4,6 м. При повышении уровней воды (по сравнению с характерными в рассматриваемый год величинами) зоны скоплений смещаются на участки с большими глубинами. Эта закономерность сохраняется даже при приведении глубин к среднему многолетнему межennale уровню воды в озере.

3. Формирование скоплений рыб происходит преимущественно на участках с температурой воды у поверхности, соответствующей средним и ниже среднего значениям по акватории.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-04-00892.

Авторы выражают благодарность за содействие и помощь в исследовании руководству и специалистам Псковского отделения ГосНИОРХ: директору к.б.н. М.М. Мельник и старшему научному сотруднику, к.б.н. С.О. Северину. Авторы также признательны научному сотруднику географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.н. Д.Н. Айбулатову за предоставленные данные гидрологических наблюдений на р. Великой.

ACKNOWLEDGEMENTS

The reported study was funded by RFBR according to the research project No 17-04-00892.

Authors are grateful to management and specialists of the Pskov branch of GosNIORH for assistance in the research: to Director, Candidate of Biological Sciences M.M. Mel'nik and to Senior Researcher, Candidate of Biological Sciences S.O. Severin. Authors are also grateful to Researcher of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University, Candidate of Geographical Sciences D.N. Aibulatov for provided hydrological observations on the Velikaya River.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев П.В., Чистов С.В.* Картографирование биопродуктивности Псковского озера // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова / Ред. М.В. Зимин, П.Е. Каргашин, М.В. Кусильман и др. М.: КДУ, 2017. С. 14–24.
2. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России // Информационно-аналитический центр регистра и кадастра РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. – Режим доступа: <http://gis.vodinfo.ru/>. Дата обращения: 30.03.2018.
3. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.
4. *Симонов Ю.Г.* Морфометрический анализ рельефа. М.; Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. 272 с.
5. *Ardizzone G.D.* An attempt at a global approach for regulating the fishing effort in Italy SIBM 1994 // *Biol. Mar. Medit.* 1994. V. 1, N 2. P. 109–113.
6. *Bobyrev A.E., Kriksunov E.A., Murzov N.N. et al.* Stock status and current tendencies in the population dynamics of commercial fishes of Pskov-Chudskoe water body // *J. Ichthyology*. 2013. V. 53, N 1. P. 28–40. DOI: 10.1134/S0032945213010037.
7. *Corsi F.* Geographical Information Systems and Surplus Production Models: a new model for spatial assessment of demersal resources // *Towards the Use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries* / M. Taconet and A. Bensch (Eds.). *Informes y Estudios COPEMED*. 2000. V. 4. P. 1–6.
8. *Kangur K., Haberman J., Kangur A. et al.* History of investigations on the ecosystem of Lake Peipsi // *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.* 2001. V. 50, N 3. P. 169–179.
9. *Lammens E., Kangur A., Kangur P., Melnik M.* Fish stock and fishery // *In the mirror of a Lake Peipsi and IJsselmeer for mutual reference* / Eds. Eerden M. van et al. Lelystad: Rijkswaterstaat, 2007. P. 113–121.
10. *Nõges T., Haberman J., Jaani A. et al.* General description of Lake Peipsi-Pihkva // *Hydrobiologia*. 1996. V. 338. P. 1–9. DOI: 10.1007/BF00031706.
11. *Relini G.* Programme of the Italian Ministry of the Merchant Marine for the Demersal resources in the Area 37/3 // *FAO Fish. Rep.* 336. 1985. P. 119–123.

12. *Relini G., Piccinetti C.* Ten years of trawl surveys in the Italian Seas (1985–1995) // FAO Fish. Rep. 533 (Suppl.). 1994. P. 21–41.
13. *Steenbeek J., Coll M., Gurney L. et al.* Bridging the gap between ecosystem modeling tools and geographic information systems: Driving a food web model with external spatial–temporal data // Ecological Modelling. 2013. V. 263. P. 139–151. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.04.027.

REFERENCES

1. *Ardizzone G.D.* An attempt at a global approach for regulating the fishing effort in Italy SIBM 1994. Biol. Mar. Medit. 1994. V. 1, No 2. P. 109–113.
2. *Bobyrev A.E., Kriksunov E.A., Murzov N.N. et al.* Stock status and current tendencies in the population dynamics of commercial fishes of Pskov-Chudskoe water body. J. Ichthyology. 2013. V. 53, No 1. P. 28–40. DOI: 10.1134/S0032945213010037.
3. *Corsi F.* Geographical Information Systems and Surplus Production Models: a new model for spatial assessment of demersal resources. Towards the Use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries. M. Taconet and A. Bensch (Eds.). Informes y Estudios COPEMED. 2000. V. 4. P. 1–6.
4. Information system on water resources and water management of Russian river basins. Informational and Analytical Center of the Register and Cadaster, Russian Timiryazev State Agrarian University. Web resource: <http://gis.vodinfo.ru/>, accessed 30.03.2018 (in Russian).
5. *Kangur K., Haberman J., Kangur A. et al.* History of investigations on the ecosystem of Lake Peipsi. Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol. 2001. V. 50, No 3. P. 169–179.
6. *Lammens E., Kangur A., Kangur P., Melnik M.* Fish stock and fishery. In the mirror of a Lake Peipsi and IJsselmeer for mutual reference. Eds. Eerden M. van et al. Lelystad: Rijkswaterstaat, 2007. P. 113–121.
7. Methods of studying biogeocenoses of inland water bodies. M.: Nauka, 1975. 240 p. (in Russian).
8. *Nõges T., Haberman J., Jaani A. et al.* General description of Lake Peipsi-Pihkva. Hydrobiologia. 1996. V. 338. P. 1–9. DOI: 10.1007/BF00031706.
9. *Relini G.* Programme of the Italian Ministry of the Merchant Marine for the Demersal resources in the Area 37/3. FAO Fish. Rep. 336. 1985. P. 119–123.
10. *Relini G., Piccinetti C.* Ten years of trawl surveys in the Italian Seas (1985–1995). FAO Fish. Rep. 533 (Suppl.). 1994. P. 21–41.
11. *Simonov Yu. G.* Morphometric analysis of relief. M.; Smolensk: Izd-vo SGU, 1998. 272 p. (in Russian).
12. *Steenbeek J., Coll M., Gurney L. et al.* Bridging the gap between ecosystem modeling tools and geographic information systems: Driving a food web model with external spatial–temporal data. Ecological Modelling. 2013. V. 263. P. 139–151. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.04.027.
13. *Vasilev P.V., Chistov S.V.* Mapping of Lake Pskov bioproductivity. Nauchnye issledovaniya molody huchenyh-kartografov, vypolnennye pod rukovodstvom sotrudnikov kafedry kartografii I geoinformatiki geograficheskogo fakulteta MGU imeni M.V. Lomonosova / M.V. Zimin, P.E. Kargashin, M.V. Kusilman et al. (Eds.). M.: KDU, 2017. P. 14–24 (in Russian).

Халыков Е.Е.¹

ОСОБЕННОСТИ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ НА ПРИМЕРЕ ОВРАГОВ ДОЛИНЫ РЕКИ МУКЫР

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрено изучение овражной эрозии и картографирование овражно-балочной сети с использованием данных дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологии. Современные методы картографирования при изучении овражной эрозии дают достоверные, оперативные и масштабные морфометрические характеристики и количественные сведения по темпу развития оврагов. В предгорьях гор Жетысу Алатау впервые использовались методы наземного лазерного сканирования и разновременные космические снимки для изучения развития овражной эрозии. Исследования проводились на ключевом участке оврагов долины реки Мукыр (Коксуский район, Алматинская область, Республика Казахстан), в западной части гор Жетысу Алатау. В осенние периоды с 2012 по 2017 г. в Жетысуском регионе были проведены полустационарные наблюдения и дополнительное изучение овражной эрозии в долине р. Мукыр. Большинство оврагов в этой долине растущие, имеющие прирост вершинной и глубинной частей, преимущественно за счет флювиальных процессов. Статья содержит результаты полевых и камеральных исследований. Для детального инструментального изучения оврагов на ключевом участке использован наземный лазерный 3D сканер RIEGL VZ-4000, который позволил выявить точные морфометрические характеристики и темпы линейных размывов. Изучены факторы, влияющие на развитие овражной эрозии, получено количество оврагов в долине р. Мукыр, приведена морфометрическая характеристика оврагов, полученная на основе современных приборов и космических снимков. Приведены результаты анализа полученных полевых сведений, обработки космических снимков и материалов разных лет. Составлены карта овражно-балочной сети долины р. Мукыр, схемы роста вершины и площадного развития, продольные и поперечные профили оврагов и классификация цифровой модели рельефа по высотным отметкам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: овражная эрозия, овраги, ГИС-технологии, река Мукыр, Жетысу Алатау.

Erkebulan E. Khalykov²

PECULIARITIES OF MAPPING GULLY EROSION ON THE EXAMPLES OF THE GULLIES OF THE VALLEY OF THE RIVER MUKIR

ABSTRACT

The article deals with the study of gully erosion and mapping of ravine-beam network using remote sensing data of the Earth and GIS-technology. The use of modern mapping methods in the study of gully erosion provides reliable, operational and scale morphomet-

¹ Институт географии, Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22а, 050013, Алматы, Республика Казахстан, *e-mail*: e.halykov@mail.ru

² Institute of Geography, Satbayev University, Satpayev str., 22a, 050013, Almaty city, Republic of Kazakhstan, *e-mail*: e.halykov@mail.ru

ric characteristics and quantitative information on the rate of development of gullies. For the first time in the foothills of the Zhetysu Alatau mountains methods of terrestrial laser scanning and various space images were used to study the development of gully erosion. The investigations were carried out at the key section of ravines in the valley of the river Mukyr (Koksu District, Almaty Region, Republic of Kazakhstan), in the western part of the Zhetysu Alatau Mountains. In the autumn periods from 2012 to 2017 y. in Zhetysu region, semi-stationary observations and additional study of gully erosion in the valley of the river Mukyr (Koksu district) were carried out. The majority of ravines in this valley are growing, having an increase in the vertex and deep parts, mainly due to fluvial processes. The article contains the results of field and cameral research. For detailed instrumental study of ravines, a 3D laser scanner RIEGL VZ-4000 was used in the key area, which allowed to reveal the exact morphometric characteristics and rates of linear erosion. The factors influencing the development of gully erosion were studied, the number of gullies in the valley of the Mukyr River was obtained, the morphometric characteristics of ravines obtained on the basis of modern instruments and space images are given. The results of the analysis of the received field data, processing of space images and materials of different years are given. A map of the ravine-gullet network of the valley of the river Mukyr, a scheme for the growth of the summit and area development, longitudinal and transverse profiles of ravines, and the classification of the digital elevation model by elevation are compiled.

KEYWORDS: gully erosion, gullies, GIS technology, river Mukyr, Zhetysu Alatau.

ВВЕДЕНИЕ

Оврагообразование представляет собой сложный рельефообразующий процесс, связанный с поверхностным размывом горных пород временными потоками талых и дождевых вод [Косов и др., 1989].

Овраги образуются в естественных условиях на склонах речных долин, балок, суходолов, но нередко в результате хозяйственного использования земель при деградации растительности в пригородных зонах, поселках, а также при добыче полезных ископаемых и строительстве.

Овраги являются одной из распространенных деструктивных форм рельефа в горах и предгорьях Жетысу Алатау, находящихся в юго-восточном Казахстане. Эти территории на протяжении тысячелетий служат местом хозяйственной деятельности человека, что связано с их благоприятными природными условиями [Michael et al., 2010]. Усиление антропогенной нагрузки способствует формированию овражной эрозии, особенно ее активное развитие выявлено с применением космических снимков в долине р. Мукур. Там были проведены полустационарные наблюдения за оврагами различных типов, находящимися на разных стадиях развития. Исток р. Мукур расположен в западной части Жетысу Алатау в горах Шаган (2551 м), а затем через 100 км она впадает в р. Биже, в бассейне р. Каратал. Воды р. Мукур используются для орошения полей фермерских хозяйств и садов, где выращивают плодовые, кормовые и зерновые культуры.

Актуальность исследований овражной эрозии в данном регионе определяется потребностями в планировании допустимых нагрузок на природную среду, в экологически безопасном плане. Овражная эрозия наиболее опасна в предгорных и равнинных районах, где в настоящее время площади эродированных земель увеличиваются, снижается их продуктивность. Результатом проявления овражной эрозии является не только экологический (потеря плодородия), но и экономический ущерб (снижение эффективности сельскохозяйственного производства).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы исследования – полевое инструментальное (наблюдательные ключевые участки); применение высокоточного лазерного 3D сканера RIEGL VZ-4000 для получения детальной цифровой модели местности в виде массива облаков точек (с использованием программы RiscanPro для обработки полученных данных); картографическое, ГИС, дешифрирование космических снимков среднего и высокого разрешения с использованием программы ArcGIS, сравнительный, системный анализ и описание результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По географическому положению рассматриваемая территория представляет собой западные отроги Жетысу Алатау, слаборасчлененное средне-мелкогорье (горы Жанабай, Албасу, Жуантобе) с абсолютными отметками от 900 до 1600 м над уровнем моря. Рельеф сглаженный, усложненный системой пологих долин и логов, относительные превышения не превышают 200–250 м.

Исследуемая территория по геоморфологическому районированию относится к области орогенного пояса южного и юго-восточного Казахстана, укрупненному геоморфологическому району – хребтов и предгорий Жетысу Алатау [Республика Казахстан, 2006]. По морфогенетическому типу это аккумулятивный рельеф, наложенный на денудационную поверхность. Это холмисто-увалистый рельеф с большим количеством неглубоких, преимущественно сухих оврагов и долин временных водотоков с преобладанием северного направления.

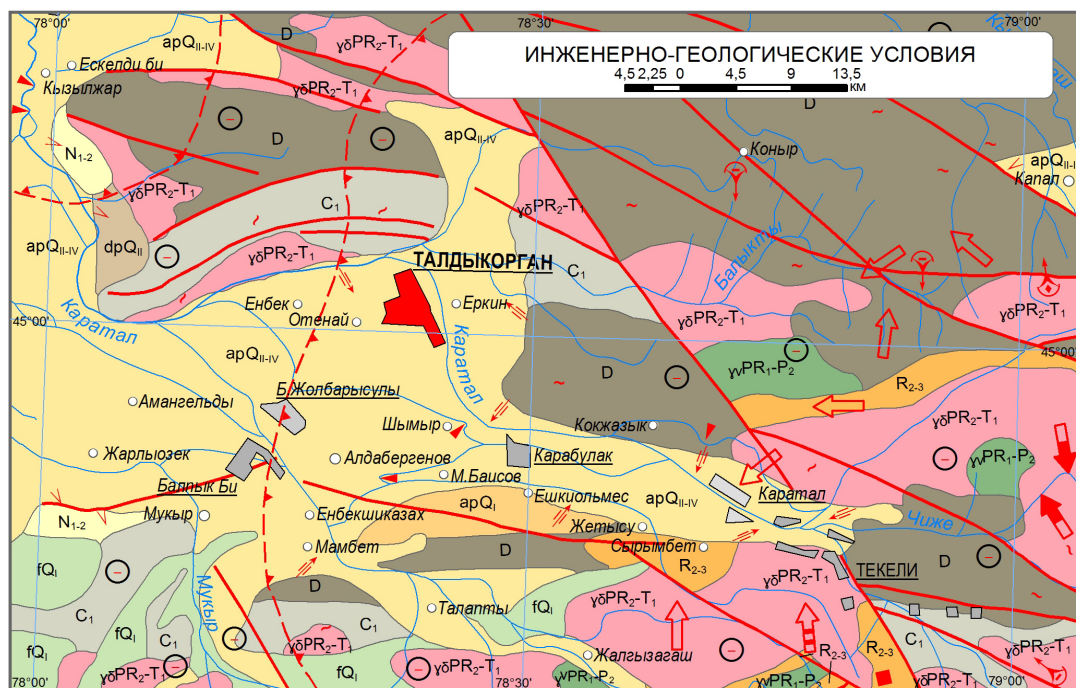
Поверхность сложена четвертичными суглинками серовато-желтого цвета, галечниками и песками. Мощность суглинков колеблется от 2,55 до 3,10 м, в среднем 2,87 м. Инженерно-геологические условия и рельефообразующие процессы показаны на рис. 1. Развитие рельефообразующих процессов протекает площадно, линейно и точечно. Процессы одновременно изменяют рельеф и участвуют в переотложении вещества, т. е. в формировании современного рельефа участка одновременно принимают участие процессы денудации и аккумуляции.

Климат района континентальный, характерны большие суточные и годовые амплитуды температуры воздуха, умеренно холодная зима и продолжительное жаркое лето. Среднегодовая температура воздуха +6...+9 °С, средняя годовая сумма осадков 380 мм. Одним из важнейших факторов оврагообразования являются гидрометеорологические условия: количество осадков, их интенсивность и распределение во времени. Для выявления взаимосвязей количества осадков и линейного роста оврагов получено суммарное количество атмосферных осадков за период исследования (рис. 2).

Наши исследования овражной эрозии в долине р. Муқыр направлены на выявление площадного распространения оврагов, скорости их роста, а также других причин ее развития.

Для получения количественных данных развития овражной эрозии в долине р. Муқыр использовались полевые исследования, целью которых были оценка динамики роста овражной эрозии и создание ключевых наблюдательных участков с постановкой реперов наблюдения. Места ключевых наблюдательных участков выбирали с применением космических снимков. Для каждого из участков определен целевой комплекс наблюдений, а также проведено описание естественных условий на данных участках. По космическим снимкам и полевым материалам на территории исследования были выделены овраги, находящиеся на разных стадиях развития (табл. 1). Исследования показали, что по правому борту долины р. Муқыр развито 34, а по левому борту – 10 овражно-балочных сетей, которые в плане имеют ветвящийся вид. Их поперечные профили клиновидные и трапециевидные, а продольный профиль полого-вогнутый (рис. 3). Измерения прироста вершин оврагов проводились один раз в год осенью (после схода весенних талых вод и после лет-

них ливней). Характеристики роста и количества оврагов, полученные во время полевых работ, учтены при дешифрировании космических снимков и сверены с данными на топографических картах.



РЕЛЬЕФОБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ

Преобладающий класс процесса	Условный знак	Ведущий тип процесса	Условный знак	Ведущий тип процесса
Денудационный		Физическое выветривание		Гравитационный:
		Эрозионный: а) плоскостной срыв б) боковая эрозия в) овражная эрозия		а) осыпной в скальных породах б) обвалный в скальных породах в) лавины (обвалы снежных масс): сход лавин ежегодно с различной средней массой сносимого снега (М), тыс. т.
		Эрозионные селевые: а) сели дождевого питания средней интенсивности (селевые бассейны III категории) б) селевые паводки, водные потоки с повышенным твердым стоком и эпизодическое проявление тальвежно-русловых выносов боковых логов относительно слабой интенсивности (селевые бассейны IV категории)		1) незначительной опасности, М<1 2) значительной опасности, М=100-10 3) исключительной опасности, М>100

ГРАНИЦЫ:

— геолого-геоморфологические — зона интенсивности землетрясений в баллах шкалы MSK-64 — РАЗЛОМЫ: достоверные, (в том числе под рыхлым чехлом)

Генезис отложений	Индекс	Возраст отложений	Литологический состав	Преобладающие экзогенные процессы
Аллювиально-пролювиальный	арQII-IV	среднечетвертичный-современный	алевриты, пески, суглинки, супеси, щебень	овражная эрозия, боковая эрозия, плоскостной срыв
	арQI	нижнечетвертичный	песчано-гравийно-галечники с линзами и прослоями суглинков и супесей	овражная эрозия, плоскостной срыв
Делювиально-пролювиальный	дрQII	среднечетвертичный	лессовидные суглинки, глины, пески, конгломераты, галечники, щебень, дресва	овражная эрозия
Флювиальные	fQI	нижнечетвертичный	валуно-галечники, дресва, щебень, пески, супеси, лессовидные суглинки	овражная эрозия
Континентальный	N1-2	миоценовый-нижнеплиоценовый	глины с прослоями песков, глиен, песчаников, конгломератов, галечников; валунники, гравелиты и гравийные пески	овражная эрозия, плоскостной срыв
Континентальный	C1	нижнекаменно-угольный	конгломераты, песчаники, алевриты, кремнистые и углистые туфиты, кремнистые алевриты, вулканиты от липаритов до дацитов, известняки	физическое выветривание, осыпи
Континентальный	D	девонский	лавы, туфы, алевриты	физическое выветривание, осыпи
Высокой степени метаморфизма	PR2-3	средневерхний рифей	сланцы, известняки, доломиты	обвалы, физическое выветривание
Интрузивный	yδPR2-T1	среднепротерозойский-нижнетриасовый	диорит-гранодиорит	осыпи, физическое выветривание, лавины
Интрузивный	yvPR1-P2	нижнепротерозойский-верхнепермский	диорит-габбро-ультрамафит	осыпи, физическое выветривание, лавины, сели

Рис. 1. Инженерно-геологические условия исследуемой территории
Fig. 1. Engineering-geological conditions of the research territory

Таблица 1. Морфометрические характеристики оврагов в долине р. Мукур, м
Table 1. Morphometric characteristics of gully in the valley of the river Mukyr, m

Количество и морфометрические характеристики оврагов по левому борту р. Мукур							
№ п/п	Длина	Вершинная часть оврага		Середина оврага		Нижняя часть оврага	
		Глубина	Ширина	Глубина	Ширина	Глубина	Ширина
1	1680	4,5	9,1	4	8,5	3,3	7
2	320	3,5	6	5	11,15	1	3
3	222	3,2	6	3,5	5,5	2,2	4,5
4	890	5,8	9	4	7,3	2,6	4,5
5	423	4,5	9,8	3	5,85	1,7	3,4
6	587	5,6	10,2	6,3	12,6	2	4,1
7	371	7,5	14	7,3	13,4	2,5	4,9
8	4118	2,2	6,1	4	7,8	5	29,3
9	154	5,27	10,4	8,4	16,6	4,5	16,6
10	73	4,3	7,2	6	11,5	3,2	5,2
11	3640	7,7	17,7	5,2	10,6	3,6	6,1
12	5863	4,5	7,7	10,9	21,4	4,3	12,3
13	464	4,9	8,5	4,4	7,6	3,2	9
14	292	3,6	8,7	4,6	11,3	2	4,8
15	554	4	8,8	2,7	4,5	3	10,7
16	307	1,7	3,6	2	5,4	3,6	8,4
17	431	1,8	3,8	4,3	8,7	2,9	7,9
18	58	2,3	4	3	8,1	2,8	7,8
19	193	4,5	8,8	2,9	5,7	2,9	7,3
20	3677	3,3	6,2	5,3	11	4,7	10
21	475	2,8	5,9	2,2	6,7	2,8	7
22	191	2,5	4,4	1,5	3,5	0,5	2
23	1885	6,1	15,8	13,3	30,1	2,2	6,4
24	3449	5,4	16	4,7	8,6	4,2	7,2
25	579	4,8	13,4	6,7	13,4	2	4,3
26	491	3,8	6	3,2	6,5	1,9	3,9
27	288	3,6	5,85	1,6	4,1	1,4	4,2
28	199	2,3	4,2	3,2	5,4	1,5	3,3
29	1539	4,4	8,6	6,8	12,4	2,4	4,8
30	1592	8,3	15,9	9	20,2	4,6	13,5
31	1194	9,5	18,2	9,8	18,7	7,5	16,8
32	1372	7,2	19,4	6,2	17,2	5,5	9,5
33	8175	5,5	9,5	7,4	13,75	3,9	13,25
34	129	2,2	5,4	3,8	6,9	1,8	3,2
Количество и морфометрические характеристики оврагов по правому борту р. Мукур							
	Длина	Вершинная часть оврага		Середина оврага		Нижняя часть оврага	
		Глубина	Ширина	Глубина	Ширина	Глубина	Ширина
1	185	2,2	5	2,3	4,6	1,8	3
2	560	4,4	7,3	5,7	10,1	3,3	7,2
3	1315	6,7	13,8	6,7	14,7	2,4	5,6
4	721	2,8	6,2	2,6	4,6	2,3	4,6
5	1704	3,8	6,8	3,7	9,2	3,3	8,7
6	462	5	12,7	6,3	13,1	3,9	8,3
7	640	6,8	11,4	5,2	9,9	4,3	8,1
8	472	2,1	3,87	2,5	5,5	2,4	4,5
9	199	2,8	4,95	4,1	8,7	3,7	6,73
10	841	7,9	15,7	4,7	10,3	4	6,3



Рис. 2. Суммарное количество атмосферных осадков
Fig. 2. Total amount of precipitation



Рис. 3. Овраги в долине р. Мукур
Fig. 3. Gullies in the valley of the river Mukyr

Во время полевых работ с 2012 по 2017 г. один раз в год проводилась фиксация линейного и площадного прироста оврагов, их углубления, изменения сопутствующих процессов, протекающих на склонах и днищах. Дальнейшая обработка в камеральных условиях линейного и площадного прироста оврагов проводилась с применением метода реперов (табл. 2). Рост вершины наблюдаемых оврагов в долине р. Мукур составляет 0,3–4,7 м/год, среднегодовой рост составляет 2,56 м/год (использовались наблюдения за шестью вершинами оврагов в течение

5 лет). На построенной диаграмме (рис. 4) отражен рост вершинной части оврагов за 5 лет наблюдений. Преобладающий прирост оврага приходится на весенний период. К основным факторам, определяющим рост оврагов, относятся интенсивность весеннего стока и ливни, механический состав горных пород и крутизна склонов. Полученные данные позволяют утверждать, что овражная эрозия является наиболее активным фактором преобразования рельефа в долине р. Мукыр. Наиболее тревожными являются овраги, вершины которых врезаются в поля и пастбища. Из полей по тальвегам данных оврагов на низкие гипсометрические уровни (поймы и террасы рек) и водоемы выносятся компоненты минеральных удобрений и пестицидов, тем самым загрязняется водная среда.

Таблица 2. Прирост вершин оврагов (м) и смытый объем по годам (м³)
Table 2. The gain of the peaks of the gullies (m) and the washed-out volume by years (m³)

Пункт исследования	№ п/п	№ по GPS	Вершины	2013	2014	2015	2016	2017
с. Мукры, 3 км юго-западнее, 235 км автодороги Мукры – Алматы (Коксуский р-н)	1	686–690	А	<u>1,1</u> 20	<u>1,55</u> 25	<u>0,8</u> 18	<u>1,3</u> 22	<u>0,32</u> 7
			С	<u>1</u> 11	<u>1,2</u> 16	<u>0,5</u> 4,3	<u>1,45</u> 16	<u>4,75</u> 14
	2	691–692		<u>2,3</u> 8	<u>3,5</u> 18	<u>1,2</u> 1,45	<u>0,45</u> 0,25	–
	3	409–410					<u>1,1</u> 20	<u>0,74</u> 20
	4	766–769				0,3	–	–

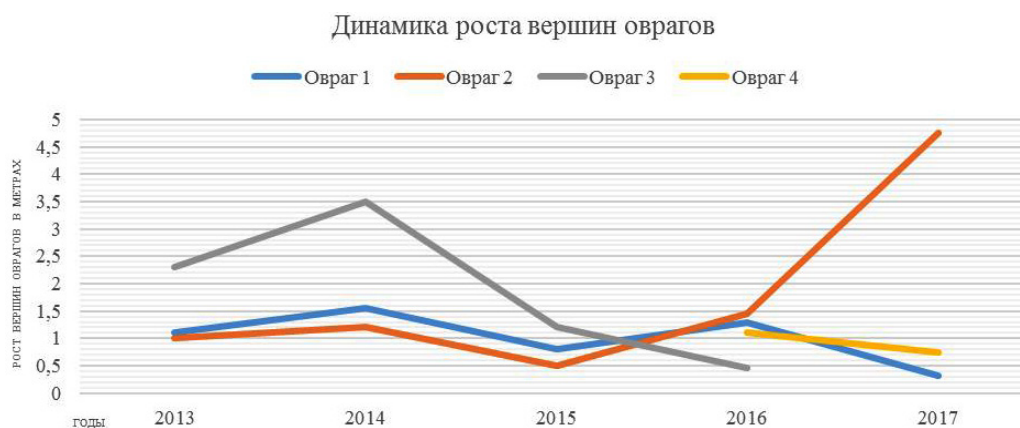


Рис. 4. Диаграмма роста вершин оврагов в долине р. Мукыр
Fig. 4. The diagram of the growth of the peaks of gullies in the valley of the river Mukyr

Современные ГИС-технологии позволяют получать морфометрические показатели рельефной среды, наблюдать динамику изменения во времени, обеспечивая более объективную и комплексную оценку развития овражной эрозии. Изучение овражной эрозии в пределах исследуемого региона с появлением новых технических возможностей (ГИС-технологии, трехмерное лазерное сканирование) дает существенные возможности для более масштабного охвата территории, детального получения параметров отдельных оврагов, данных для всестороннего анализа динамики и закономерностей развития овражной эрозии. Технологический процесс обработки космических снимков состоял из последовательного выполнения следующих основных этапов: выбора и получения космических снимков; их привязки (трансформирования), разработки принципов; дешифрирования и оцифровки

объектов рельефа; разработки структуры цифровой карты; оформления картографического материала. Проведение мониторинга изменений на поверхности рельефа с использованием космической информации позволяет получить независимую информацию о масштабах развития овражной эрозии и дальнейшей ее «наземной» проверке. При определении и нанесении овражно-балочных систем на карты дешифровочными признаками служат бровки склонов, тальвеги оврагов, ровный тон окраски склонов и дна. По материалам исследования создана карта овражно-балочной сети в долине р. Мукры (рис. 5).

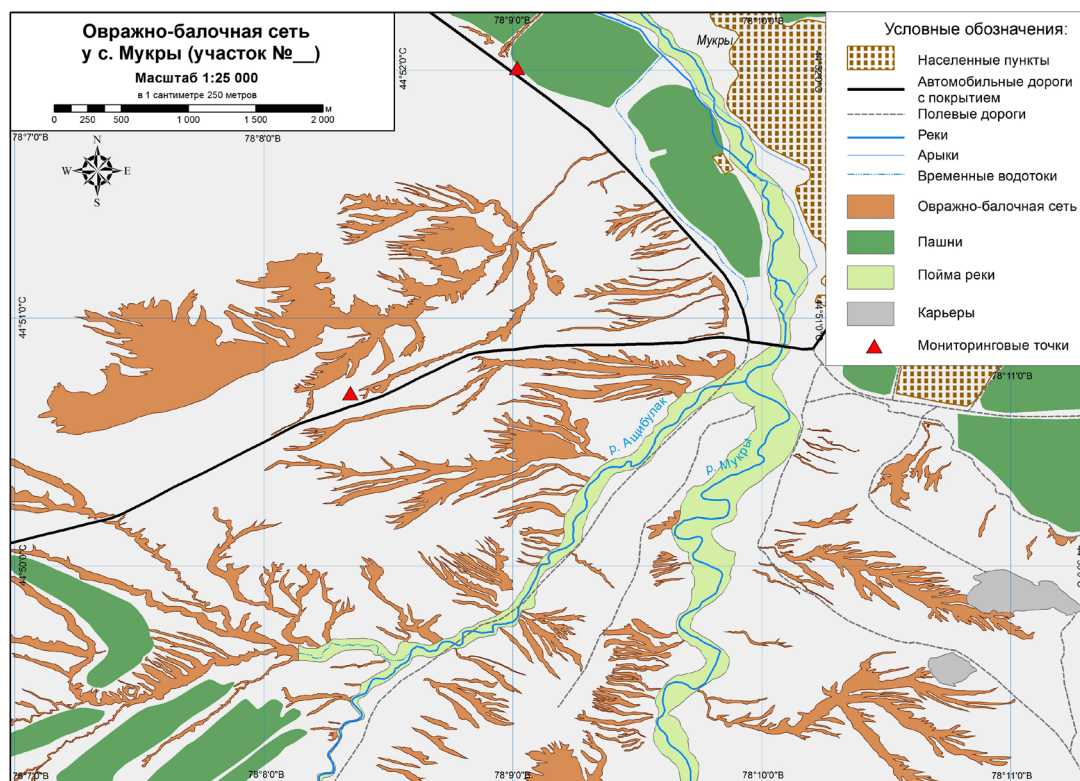


Рис. 5. Овражно-балочная сеть в долине р. Мукыр
Fig. 5. Gully-beam network in the valley of the river Mukry

Для наблюдения динамики овражной эрозии с помощью разновременных космических снимков в долине р. Мукыр нами были выбраны две вершины единой овражно-балочной сети (3 км юго-западнее с. Мукыр, на западной стороне 235 километра автодороги Алматы – Усть-Каменогорск). Общая длина единой овражно-балочной сети 6,3 км, крутизна склонов варьируется от 1 до 9,9°, а перепад высот составляет 296 м.

Прирост вершинной части оврага № 1 составил 11,82 м, площадное развитие – 0,46 га за 13 лет (рис. 6). Прирост вершинной части оврага № 2 за 13 лет – 126,3 м, площадное развитие – 1,2 га (рис. 7). Продольный профиль оврага № 2 имеет пологовогнутую форму (рис. 8). Экспозиция склонов и литологический состав обоих оврагов одинаков. Разница роста двух вершин одной овражной сети в длину – более 10, а по площади развития – 3 раза. Эта объясняется тем, что крутизна общего склона изменяется от 3,2° (овраг № 1) до 5,1° (овраг № 2).

По полученным результатам можно сделать следующий вывод: даже при небольшом увеличении крутизны склонов существенно растет активность овражной эрозии. Данные подтверждают, что условия рельефа и литологическое строение являются ведущими факторами оврагообразования в исследуемом районе.

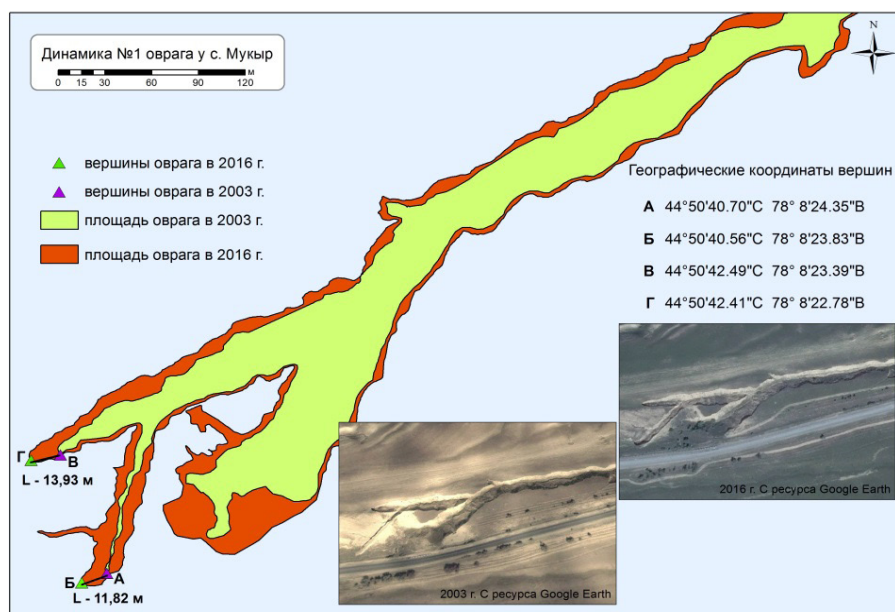


Рис. 6. Рост вершины и площадное развитие оврага № 1 в долине р. Мукур
Fig. 6. The growth of the summit and the area development of the gully No1 to the valley of the river Mukyr

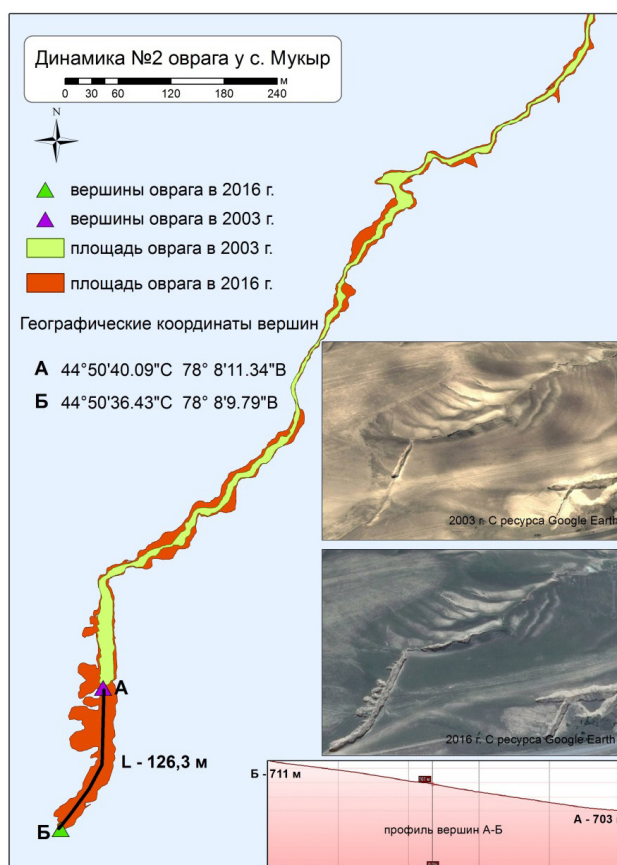


Рис. 7. Рост вершины и площадное развитие оврага № 2 в долине р. Мукур
Fig. 7. The growth of the summit and the area development of the gully No 2 to the valley of the river Mukyr

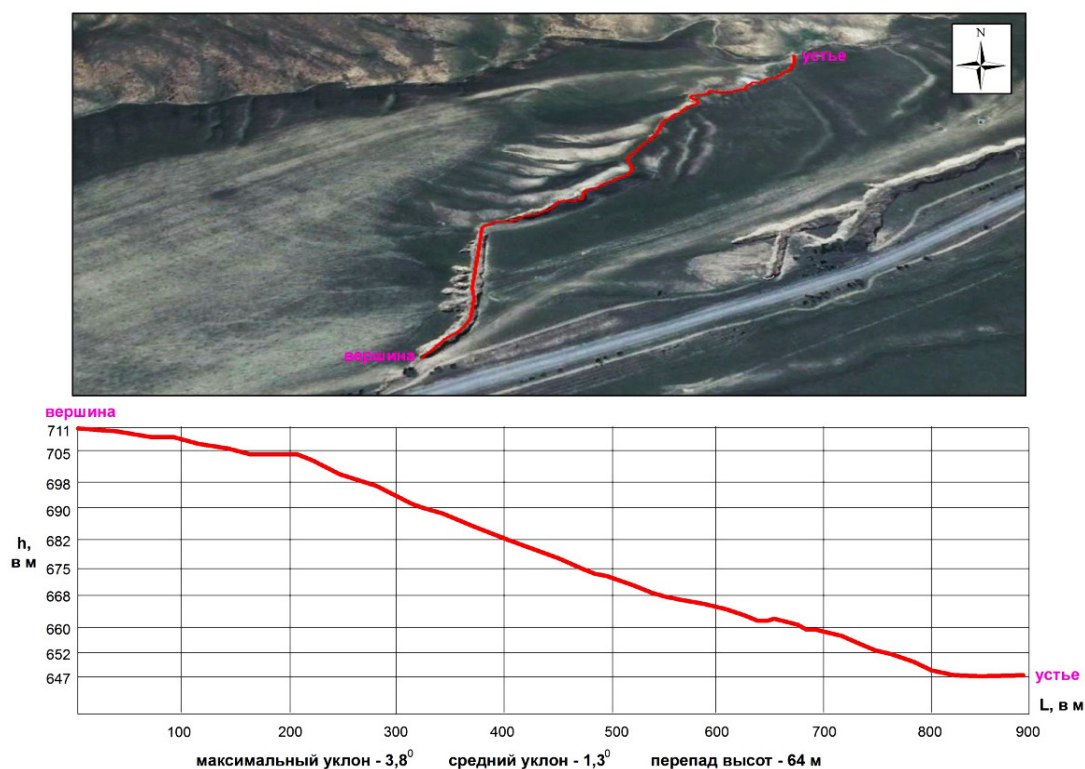


Рис. 8. Продольный профиль оврага № 2 в долине р. Мукры
Fig. 8. The longitudinal profile of the gully No 2 to the valley of the river Mukyr

К одному из методов для регистрации и оценки развития рельефообразующих процессов, который дает количественную информацию, относится метод наземного лазерного сканирования. Он позволяет оперативно получать трехмерные данные, с высокой точностью показывающие изменения в рельефе местности, характеризую процесс денудации и аккумуляции.

Особенно эффективно использование наземного лазерного сканирования при мониторинге речевой и плоскостной эрозии, на которые приходится более 2/3 площади склона, в том числе площади распаханых земель [Ермолаев, 2002; Гафуров, 2016; Гафуров и др., 2017].

Работы по оценке динамики овражной эрозии с помощью сканирующего прибора состояли из полевого и камерального этапов. Полевые работы проводились в 2017 г. Использовался наземный трехмерный лазерный сканер RIEGL VZ-4000. Для наблюдения за овражной эрозией были выбраны два оврага в долине р. Мукры, о которых сказано выше. Проведено первое сканирование оврагов для количественной и качественной оценки овражной эрозии. В дальнейшем при повторных съемках данных оврагов и камеральной обработке результатов сканирования ожидаются детальные показатели изменений овражной эрозии. На первоначальном этапе при обработке результатов сканирования в виде облака точек в программе RiSCANPRO получены поперечные и продольные профили оврагов (рис. 9), а также классификация цифровой модели рельефа по высотным отметкам через 5 м (рис. 10).

Отметим, что метод наземного лазерного сканирования открывает широкие возможности получения количественных данных и определения закономерностей развития овражной сети. Имея высокую точность, данный метод позволит регистрировать и другие геоморфологические процессы.

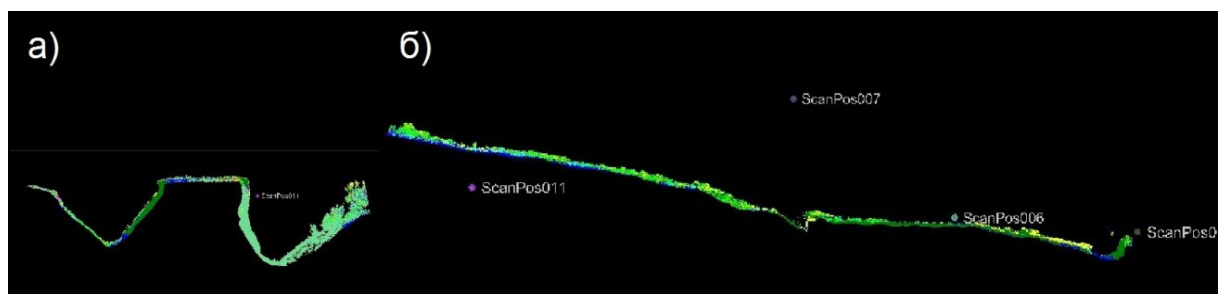


Рис. 9. Профили оврага: а – поперечный; б – продольный
Fig. 9. The gully profiles: a – transverse; b – longitudinal

Классификация ЦМР оврага Мукур-1 по высотным отметкам

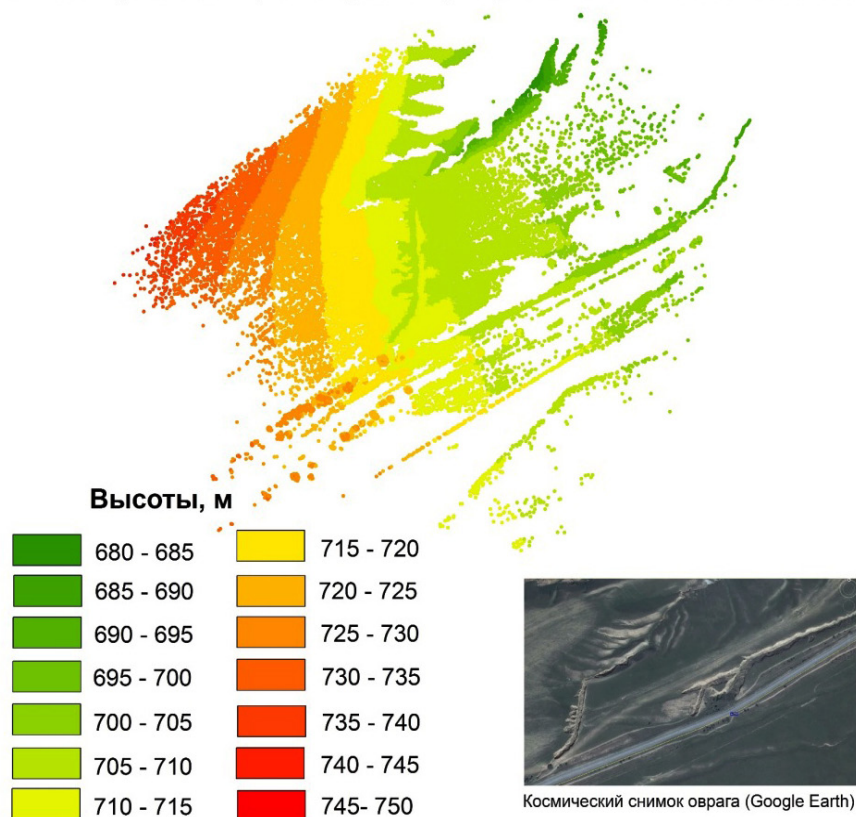


Рис. 10. Классификация цифровой модели рельефа по высотным отметкам через 5 м
Fig. 10. Classification of the digital relief model by elevation 5 m

ВЫВОДЫ

Результатами выполненных работ являются количественные морфометрические данные роста оврагов и полная карта овражно-балочной сети долины р. Мукур. Полученные впервые трехмерные данные оврагов в виде облака точек служат началом последующих наблюдений. На ключевом участке выявлена динамика роста каждого из исследуемых оврагов в связи с комплексом природных условий и их изменением. В долине р. Мукур определяющими факторами роста оврагов являются механический состав субстрата, атмосферные осадки (весенний сток, летние ливни), крутизна и длина склонов. Полученные материалы позволяют утверждать, что овражная эрозия является наиболее активным фактором преобразования рельефа долины р. Мукур.

Интенсивное развитие овражной эрозии увеличивает экологическую напряженность природно-антропогенной среды в регионе. Разрастание овражной сети, ее активное развитие ухудшает качество сельскохозяйственных земель и создает угрозу объектам дорожной и селитебной инфраструктуры. В последнее время борьба с овражной эрозией практически не организована, хотя понятно, что экологические и экономические последствия этого негативного процесса могут быть значительными не только в долине р. Мукур, но и для всего региона с продуктивными сельхозугодьями.

Полученные результаты актуальны при планировании и проведении инфраструктурных и сельскохозяйственных работ и требуют мероприятий по защите земель в зависимости от распространения и потенциальной опасности овражной эрозии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке проекта: Географические основы обеспечения безопасности природопользования горных и равнинных территорий Казахстана, проект № 0112PK00625.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the project: Geographical bases for ensuring the safety of nature management of mountainous and lowland areas of Kazakhstan, project No 0112PK00625.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гафуров А.М. Оценка интенсивности и динамики почвенной эрозии методом наземного лазерного сканирования // Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования молодых ученых университетов): Сб. ст. по материалам XI семинара молодых ученых вузов, объединяемых Межвузовским научно-координационным советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Новгород: Мининский университет, 2016. С. 81–90.
2. Гафуров А.М., Веденеева Е.А., Ермолаев О.П., Усманов Б.М. Использование метода наземного лазерного сканирования для оценки интенсивности современных экзогенных процессов // Трешниковские чтения: Материалы VII всерос. науч.-практ. конф. Ульяновск, 2017. С. 14–17.
3. Ермолаев О.П. Эрозия в бассейновых геосистемах. Казань: Унипресс КГУ, 2002. 265 с.
4. Косов Б.Ф., Зорина Е.Ф., Любимов Б.П. и др. Овражная эрозия / Под ред. Р.С. Чалова. М.: МГУ, 1989. 166 с.
5. Республика Казахстан. Т. 1. Природные условия и ресурсы / Ред. Н.А. Искаков, А.Р. Медеу. Алматы, 2006. 202 с.
6. Michael D. Frachetti, Norbert Benecke, Alexei N. Mar'yashev, Paula N. Doumani. Eurasian pastoralists and their shifting regional interactions at the steppe margin: settlement history at Mukri, Kazakhstan // *Debates in World Archaeology. World Archaeology*. 2010. V. 42, Issue 4.

REFERENCES

1. Ermolaev O.P. Erosion in basin geosystems. Kazan: Unipress of KSU, 2002. 265 p. (in Russian).
2. Gafurov A.M. Estimation of the intensity and dynamics of soil erosion by the method of ground-based laser scanning, Erosion, watercourse and estuarine processes (research of young scientists of universities): a collection of articles on the materials of the XI seminar of young scientists of universities, united by the Interuniversity Scientific Coordination Council on the problem of erosion, watercourse and estuarine processes. Novgorod: Minin University, 2016. P. 81–90 (in Russian).

3. *Gafurov A.M., Vedeneeva E.A., Ermolaev O.P., Usmanov B.M.* Using the method of ground-based laser scanning to estimate the intensity of modern exogenous processes. Treshnikov readings, materials of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference. Ulyanovsk, 2017. P. 14–17 (in Russian).
4. *Kosov B.F., Zorina E.F., Lyubimov B.P. et al.* Gully erosion / Ed. R.S. Chalov. Moscow: MGU, 1989. 166 p. (in Russian).
5. *Michael D. Frachetti, Norbert Benecke, Alexei N. Mar'yashev, Paula N. Doumani.* Eurasian pastoralists and their shifting regional interactions at the steppe margin: settlement history at Mukri, Kazakhstan. *Debates in World Archaeology. World Archaeology.* 2010. V. 42, issue 4.
6. Republic of Kazakhstan. V. 1. Natural settings and natural resources / N.A. Isakov, A.R. Medeu (eds.). Almaty, 2006. 202 p. (in Russian).

Выручалкина Т.Ю.¹, Фролов А.В.²

БАТИМЕТРИЧЕСКИЕ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОЛЬШОГО ЯШАЛТИНСКОГО ОЗЕРА В МОДЕЛИРОВАНИИ ВОДНО-СОЛЕВОГО БАЛАНСА ВОДОЕМА

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты работ по созданию батиметрической модели гипергалинного Большого Яшалтинского озера. Основой модели Большого Яшалтинского озера послужили данные экспедиционных исследований, проведенных весной 2014 г. Озеро представляет собой мелководный водоем, с преимущественно отмелями, чрезвычайно топкими берегами. Это обстоятельство сильно затрудняет проведение работ по определению площади зеркала озера и прибрежных глубин. Поэтому соответствующие наблюдения нами проводились с борта судна на воздушной подушке. Натурные данные использовались для создания цифровой модели местности, включая озеро. Цифровая модель местности создана по результатам оцифровки топографических карт с помощью программного пакета **Golden Software (Didger 5, Surfer 12)**. В результате совместной обработки экспедиционных данных и цифровых карт впервые получена батиметрическая модель озера, морфометрические и батиметрические зависимости озера, построена батиметрическая карта. Полученная модель чаши озера была использована для моделирования водного баланса и солености вод Большого Яшалтинского озера. Выполнен анализ продуктивности галофильного рачка *Artemia salina* в зависимости от температуры воды и солености Большого Яшалтинского озера. Показано, что продуктивность рачка *A. salina* зависит от солености вод озера. Рассмотрены три варианта управления режимом водного баланса озера. Показано, что оптимальная соленость, обеспечивающая комфортное существование озерного зоо- и фитопланктона и максимальную продуктивность *A. salina*, поддерживается таким режимом подачи воды в Большое Яшалтинское озеро, при котором вода в озеро дополнительно подается в феврале-марте и июне-сентябре.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: батиметрические и морфометрические характеристики озера, водно-солевой баланс, уровень, динамико-стохастическое моделирование.

¹ Институт водных проблем Российской академии наук, ул. Губкина, д. 3, 119333, Москва, Россия, e-mail: vyruchi@list.ru

² Институт водных проблем Российской академии наук, ул. Губкина, д. 3, 119333, Москва, Россия, e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru

Tatiana Yu. Vyruchalkina¹, Anatoliy V. Frolov²

BATHYMETRIC AND MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE BOLSHOE YASHALTINSKOE LAKE IN THE MODELING OF RESERVOIR'S WATER-SALT BALANCE

ABSTRACT

This article presents the results of works on creation of bathymetric models hyperhaline Bol'shoe Yashaltinskoe Lake. The basis of the model of the Bol'shoe Yashaltinskoe Lake was the data of expedition research on the lake, conducted in the spring of 2014, as well as the results of the creation of a digital model of the terrain, including the lake. Digital terrain model created by digitizing topographic maps using the software package Golden Software (Didger 5, Surfer 12). As a result of the joint processing of forwarding data and digital maps for the first time obtained bathymetric model of the Bol'shoe Yashaltinskoe Lake, its morphometric and bathymetric dependence, built bathymetric map. A method is proposed for modeling lake water balance and water salinity based on geographic analogy and an algorithm for constructing a stochastic vector autoregression process. On the basis of new data on morphometry and bathymetry of the lake, realizations of the simulated series of lake water balance components and water salinity variations over 1000 years with a monthly step are constructed. Analysis of productivity halophilic crustacean *Artemia salina*, depending on water temperature and salinity Bol'shoe Yashaltinskoe Lakes are made. It is shown that the productivity of crustacean *A. salina* depends on the salinity of the lake waters. Three options for managing the lake's water balance regime are considered. It is shown that for maintenance of optimum salinity which will provide comfortable existence of a lake zoo- and phytoplankton and the maximum productivity of *A. salina* it is a regime of water supply to the Bol'shoe Yashaltinskoe Lake, in which water is additionally supplied to the lake in February-March and June-September.

KEYWORDS: bathymetric and morphometric characteristics of the lake, water-saltbalance, level, dynamic-stochastic modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Большое Яшалтинское озеро относится к особой группе соляных озер с очень высокой соленостью вод – так называемым гипергалинным озерам, соленость которых превышает 36 ‰, достигая примерно 450 ‰. Б. Яшалтинское озеро входит в число наиболее крупных лиманных озер в пределах Кумо-Манычской впадины в пойме реки Западный Маныч – территории бывшего морского пролива, соединявшего Азовское и Каспийское моря.

Интерес к соляным озерам издавна был обусловлен разработкой минеральных богатств – добычей растворов солей – различных химических соединений – из озерных вод и донных отложений и погребенных растворов (хлориды, сульфаты и пр.). Существенно использование лечебных илов солевых озер в бальнеологии. В последние десятилетия внимание к солевым озерам связано с возможностью промышленного разведения в этих озерах некоторых видов галофильной фито- и зоофауны.

¹ Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkina str., 3, 119333, Moscow, Russia, e-mail: vyruchi@list.ru

² Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkina str., 3, 119333, Moscow, Russia, e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru

Водоемы с повышенной минерализацией традиционно рассматриваются как местообитания живых организмов, способных к жизни в экстремальных условиях существования. Лимитирующее влияние высокой солености способствует формированию специфического биоценоза, структура которого значительно отличается от пресноводной биоты. Следует отметить, что исследования гипергалинных озер проводились почти всегда в отношении их сравнительного описания, гидрохимических и геологических характеристик [Егоров, Космаков, 2010]. В последнее время активно изучаются экологические особенности этих водоемов [Бамбеева и др., 2009; Литвиненко, 2009; Иванова и др., 2012; Овчинников и др., 2015]. Озерная гидрология, за исключением уровненного режима, до сих пор затрагивалась в значительно меньшей степени. Наблюдений за водным балансом таких озер – притоком пресных вод, испарением, осадками – оказалось очень мало, в этом отношении наиболее изученным считается Большое Соленое озеро (США) [Great Salt Lake..., 1980].

Большое Яшалтинское озеро имеет значительный рекреационно-лечебный и хозяйственный потенциал вследствие наличия лечебных илово-сульфидных грязей и возможности промышленного разведения водорослей *Spirulina salina*, *Dunaliella salina* и галофильного рачка *Artemia salina*. Однако из-за разбора поверхностного притока на сельскохозяйственные цели к 2014 г. озеро практически пересохло. Восстановление озера возможно было только при по подаче воды из отдаленного источника. Для определения необходимого объема притока воды в озеро авторам потребовалось решить задачу моделирования (именно моделирования, не «восстановления», ибо последнее просто невозможно) основных составляющих водного баланса – поверхностного притока, осадков и испарения, отвечающих естественному гидрологическому режиму озера. Необходимым условием для моделирования водного баланса озера является наличие информации о батиметрических и морфометрических характеристиках чаши озера. До проведения нами экспедиционных исследований существовали только данные отдельных наблюдений, ни батиметрия, ни морфометрия озера не были изучены с необходимой полнотой. Данных о систематических многолетних наблюдениях за составляющими водного баланса озера не существует, что приводит к необходимости моделирования этого баланса, для чего совершенно необходима информация о чаше озера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

До последнего времени сведения о морфометрии и батиметрии озера имели фрагментарный характер. Например, площадь зеркала не имела привязки к уровню воды в озере, измерения глубины озера были единичными. Некоторые сведения о колебаниях уровня озера приведены в [Бамбеева и др., 2009]. Согласно этой статье, в многоводный 2002 г. озеро не пересыхало, глубина озера весной была 50–60 см. В засушливый 2003 г. весной глубина равнялась 10–20 см, причем озеро полностью пересохло в августе.

Более подробная информация о морфометрических и батиметрических характеристиках озера была получена при проведении наших экспедиционных исследований весной 2014 г. Следует отметить, что Б. Яшалтинское озеро представляет собой мелководный водоем с преимущественно отмелями, чрезвычайно топкими берегами. Это обстоятельство сильно затрудняет определение площади зеркала озера и прибрежных глубин. Поэтому соответствующие наблюдения проводились нами с борта судна на воздушной подушке.

Съемка линии уреза воды и измерения глубины озера были проведены по нескольким разрезам. Координаты точек наблюдений определялись с помощью навигатора GARMIN eTrex30. Точки определения координат располагались, по возможности, относительно равномерно, с учетом рельефа местности, реже – на прямолинейных участках береговой линии, чаще – на извилистых участках. Всего было проведено определение координат 39 точек. Глубины озера измерялись на трех разрезах, всего в 38 точках. Также был выполнен отбор

проб воды по всей акватории озера. Дополнительно были привлечены карты окружающей местности масштаба 1 : 25 000. С помощью программ Digger 5, Surfer 12 пакета Golden Software произведена оцифровка карт и построена модель местности, включая озеро.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки полученных натуральных и цифровых данных впервые была построена батиметрическая карта озера (рис. 1). Озеро имеет четко выраженные крутые берега и совершенно плоское дно с едва заметным понижением к центру.

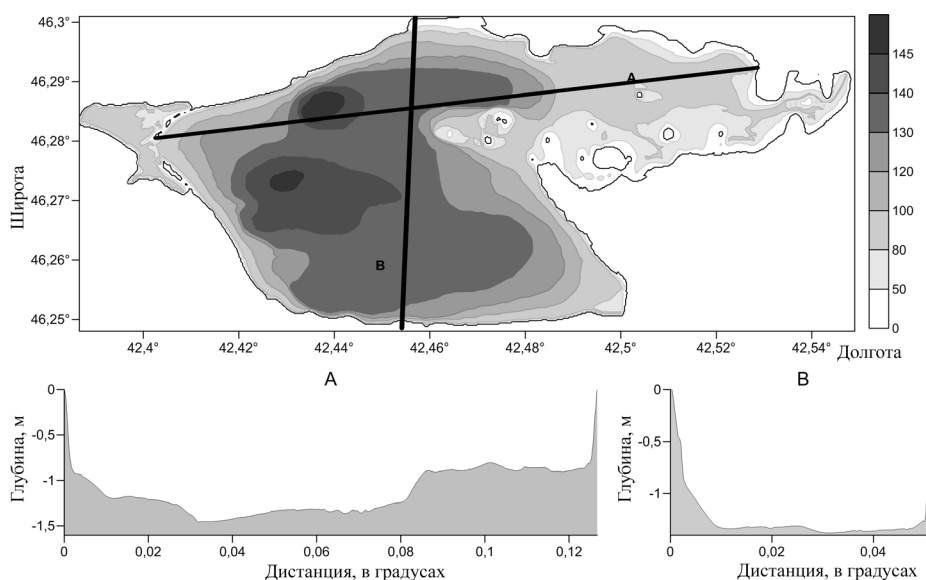


Рис. 1. Батиметрическая карта Большого Яшалтинского озера (вверху),
глубины указаны в см, и профили (внизу)

Fig. 1. Bathymetric map of Bol'shoe Yashaltinskoe Lake (above),
depths are indicated in cm, and profiles (below)

Площадь водного зеркала при наблюдавшейся во время съемки максимальной глубине озера 1 м оказалось равной 38 км². Зависимости площади зеркала и объема чаши озера от уровня воды, построенные по данным наблюдений, приведены на рис. 2.

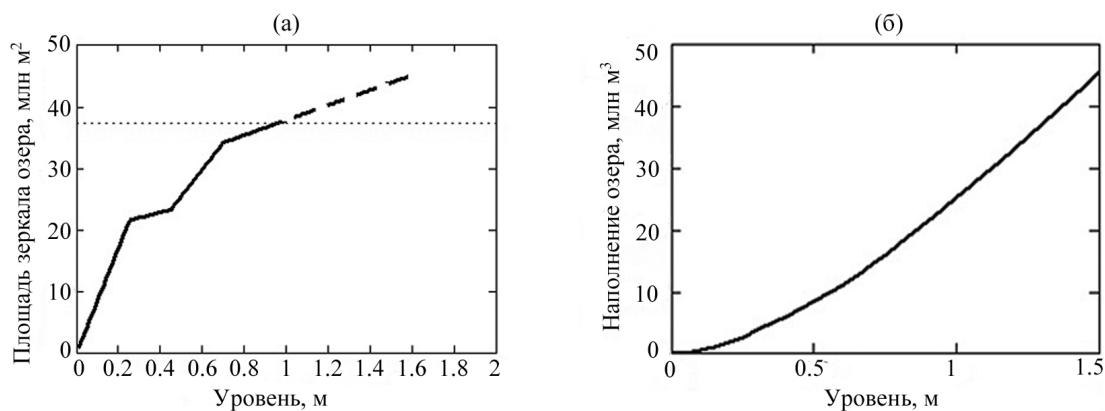


Рис. 2. Морфометрические зависимости для Большого Яшалтинского озера:
а – между площадью зеркала озера и уровнем; б – между наполнением и уровнем

Fig. 2. Morphometric relationships for Bol'shoe Yashaltinskoe Lake:
a – between the surface area of the lake and the level; b – between the filling and the level

Аналитически зависимость площади зеркала озера от уровня $F(h)$ выражается формулой:

$$F(h) = \begin{cases} 86.0 h + 0.05, & 0 < h < 0.25 \\ 8.9 h + 19.3, & 0.25 \leq h < 0.45 \\ 45.4 h + 3.8, & 0.45 \leq h < 0.70 \\ 12.2 h + 25.7, & h \geq 0.7 \end{cases} \quad (1)$$

где уровень h измеряется в метрах, площадь зеркала озера $F(h)$ – в км². Зависимость наполнения озера от уровня $W(h)$ легко находится как интеграл

$$W(h) = \int_0^h F(z) dz,$$

где $F(z)$ определяется зависимостью (1).

Соли поступают в озеро посредством вымывания дождевыми, тальными и грунтовыми водами морских солевых грунтовых отложений. Значение озера – экономическое, бальнеологическое, экологическое – существенно зависит от того, насколько солевой режим будет благоприятным для образования лечебных илово-сульфидных грязей и разведения аквакультур. Озерный зоо- и фитопланктон служит пищей для многочисленных видов водоплавающих птиц.

Согласно имеющимся данным, солёность вод озера обычно имеет сильно выраженный сезонный ход. Весенний половодный приток в озеро распределяет озерную воду, солёность уменьшается, летом сильное испарение в сочетании с малым поступлением пресной воды в озеро приводит к увеличению солёности. Например, весной 2003 г. солёность была 223 г/л, летом солёность увеличилась до 441 г/л. Многолетние вариации солёности оцениваются диапазоном от 78 до 447 ‰ [Бамбеева и др., 2009]. По нашим измерениям, в феврале 2014 г. солёность равнялась 242 ‰. С использованием полученных нами морфометрических характеристик озера (рис. 2) и измерений солёности, полученных в феврале–апреле 2014 г., была построена зависимость солёности вод озера от его наполнения (рис. 3).

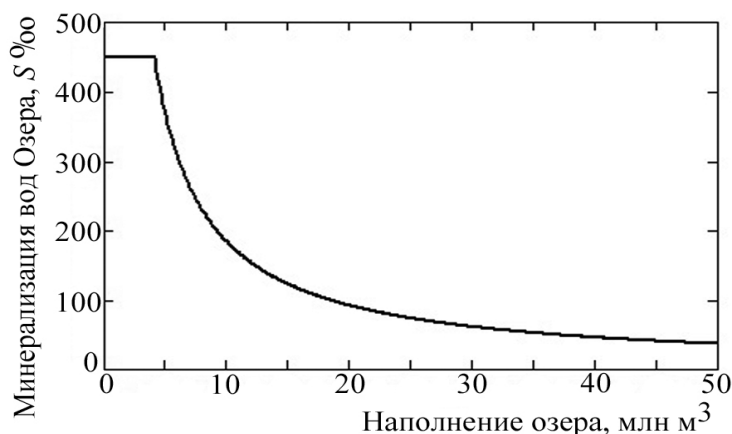


Рис. 3. Солёность воды Большого Яшалтинского озера как функция наполнения озера

Fig. 3. The salinity of the water Bol'shoe Yashaltinskoe Lake as a function of the filling of the lake

Аналитически эта зависимость имеет вид:

$$S(W) = \begin{cases} \frac{1.84 \cdot 10^9}{W}, & \text{если } \frac{1.84 \cdot 10^9}{W} \leq 450 \\ 450, & \text{если } \frac{1.84 \cdot 10^9}{W} > 450 \end{cases}$$

где солёность S выражается в промилле, ‰, наполнение W (объём воды в озере) измеряется в м³, $W > 0$. В соответствии с этой зависимостью солёность вод Б. Яшалтинского озера имеет максимум 450 ‰, что согласуется с зафиксированным максимумом 447 ‰. Предполагается, что при солёности, большей 450 ‰, происходит выпадение солей в осадок.

Испарение с гипергалинных водоемов существенно зависит, при прочих равных, от солёности воды. Увеличение солёности ведет к уменьшению испарения, повышение температуры воды увеличивает испарение [Фролов и др., 2018]. В весенние месяцы испарение увеличивается из-за повышения температуры воздуха и распреснения озерных вод половодным притоком, в осенний период уменьшение испарение вызывается уменьшением температуры воздуха и увеличением солёности вод озера.

Для стохастического моделирования испарения использовались ряды наблюдений за температурой воздуха по г. Элисте (1944–2011 гг.) как наиболее репрезентативному, по совокупности соображений, пункту. Предполагалось, что эти данные, в совокупности с данными по осадкам, отражают с достаточной точностью климатические и погодные условия для района Б. Яшалтинского озера.

Для стохастического моделирования составляющих водного баланса озера – осадков и испарения – использовался метод, основанный на представлении совокупности взаимно коррелированных величин в виде линейного преобразования некоторого набора некоррелированных величин.

В рамках проведенных расчетов для водного баланса озера был получен массив *DataPE* смоделированных месячных величин осадков p_t^i и испарения e_t^i :

$$DataPE = \begin{pmatrix} p_1^1 & p_1^2 & \dots & p_1^{12} \\ p_2^1 & p_2^2 & \dots & p_2^{12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{1000}^1 & p_{1000}^2 & \dots & p_{1000}^{12} \\ e_1^1 & e_1^2 & \dots & e_1^{12} \\ e_2^1 & e_2^2 & \dots & e_2^{12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{1000}^1 & e_{1000}^2 & \dots & e_{1000}^{12} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где i – номер месяца, $i = 1, 2 \dots 12$, t – годы, $t = 1, 2 \dots N$, N – длина моделируемого ряда. Размерность матрицы *DataPE* 2000x12, т. е. были получены смоделированные 1000-летние ряды месячных величин осадков и испарения по акватории озера.

Приток в озеро в естественном режиме проходил, главным образом, весной, в период весеннего половодья в течение 30–50, иногда – около 10 дней. Основное поступление воды в озеро осуществлялось рекой Джалгой (точнее, ее западной ветвью). Послеполоводный период характеризуется очень малым стоком или вообще полным его отсутствием. Небольшой приток происходит осенью вследствие выпадения дождей. Никаких данных наблюдений за притоком в озеро не имеется, поэтому приток был смоделирован как остаточный член водного баланса озера, т. е. как разность между испарением и осадками по озерной акватории с учетом изменения объема воды в озере.

Сезонные и многолетние колебания солёности вод озера рассчитывали по уравнению водного баланса водоема, используя смоделированные ряды притока в озеро, осадков и испарения, с учетом морфометрических характеристик озера (рис. 2) рассчитывались колебания наполнения озера. Далее использовалась зависимость солёности воды озера от его наполнения (рис. 3). В [Фролов и др., 2016, 2018] подробно представлены результаты

моделирования многолетних изменений месячных величин солености вод озера, притока в него, а также осадков и испарения. Сравнение с имеющимися натурными данными (см., например, [Бамбеева и др., 2009]) показывает, что модель удовлетворительно воспроизводит колебания солености вод озера.

В современных условиях пополнение озера возможно в управляемом режиме. Подача воды может быть осуществлена из близлежащих источников. При этом «цена» изъятий воды из источников в различные месяцы года может существенно различаться. Слово цена поставлено в кавычки, поскольку в РФ стоимость воды пока еще не определена, однако понятно, что в вегетационный период спрос на воду и, следовательно, «цена» воды выше, чем, например, в холодное время года. В связи с этим представляет практический интерес исследование возможности «закачки» в озеро воды в холодное время, с тем чтобы, однако, естественное развитие популяции жаброногого рачка не было нарушено.

Жаброногие раки рода артемия (*Artemia* sp.) являются одним из важнейших ресурсных видов водных беспозвоночных. Жизненный цикл рачка *Artemia salina* определяется соленостью и температурой вод озера. Вегетационный сезон *Artemia* на Большом Яшалтинском озере начинается при прогреве воды в среднем до плюс 18...20 °С [Бамбеева и др., 2009; Иванова и др., 2012]. Наиболее благоприятной соленостью воды для популяции *Artemia* Большого Яшалтинского озера считается диапазон 80–140 ‰ [Бамбеева и др., 2009; Иванова и др., 2012]. При увеличении солености до 200 ‰ существенно возрастает продолжительность периода созревания рачка, снижается его метаболизм и, как следствие, скорость его размножения. При солености более 300 ‰ отложенные рачком цисты (яйца) переходят в диапаузу и перестают вылупляться до наступления более низких значений солености, наблюдающихся уже на следующий год. Соленость выше 400 ‰ приводит к уменьшению популяции рачка. Самым оптимальным условием для инкубации цист *Artemia* является минерализация 20 и 40 г/л, при ней отмечается максимальный процент выклева науплиусов – 73 и 75 %, соответственно. Тем самым при регулировании поступления пресной воды в озеро можно в определенной степени воздействовать на жизненный цикл *Artemia salina*. Так, по некоторым данным, промышленное разведение *A. salina* на Большом Соленом озере (США) имеет управляемый характер. Например, к концу лета 2003 г. Большое Яшалтинское озеро полностью пересохло. Высокие температура воды (до 35 °С) и минерализация рапы (441 г/л) негативно отразились на развитии популяции рачка *A. salina* L., науплиусы и взрослые особи погибли, оставив цисты на возрождение популяции. В связи с этим весной 2004 г. производилась подача пресной воды (0,42 г/л) из р. Егорлык по каналу РР-4 (Ростовский распределитель). За счет пополнения воды величина минерализации озера в течение всего сезона оставалась постоянной (78–80 г/л), без значительных колебаний. При этом отмечено наибольшее количество самок, численность которых достигала $73,33 \times 10^2$ экз./м³, что существенно выше показателей как за 2003 г. (на 49 % больше), так и за последующие 2005–2010 гг. [Бамбеева и др., 2009]. На рис. 4 представлена зависимость биомассы рачка и его численности от минерализации воды озера. Согласно [Бамбеева и др., 2009], весной оптимальной соленостью условно можно считать 50–170 ‰, летом – 50–250 ‰.

Различные графики подачи воды в озеро могут иметь следствием различный характер воздействия на минерализацию вод озера. Другими словами, эффективность подачи воды зависит от распределения по времени поступления воды в озеро. Под эффективностью подачи в данном случае понимается обеспечение некоторой оптимальной минерализации, например, не более 170 ‰ весной и 250 ‰ летом. Если график подачи воды удерживает в течение вегетационного периода рачка (с начала апреля до конца августа – начала сентября) минерализацию воды не более указанных величин, то такой график считается оптимальным.

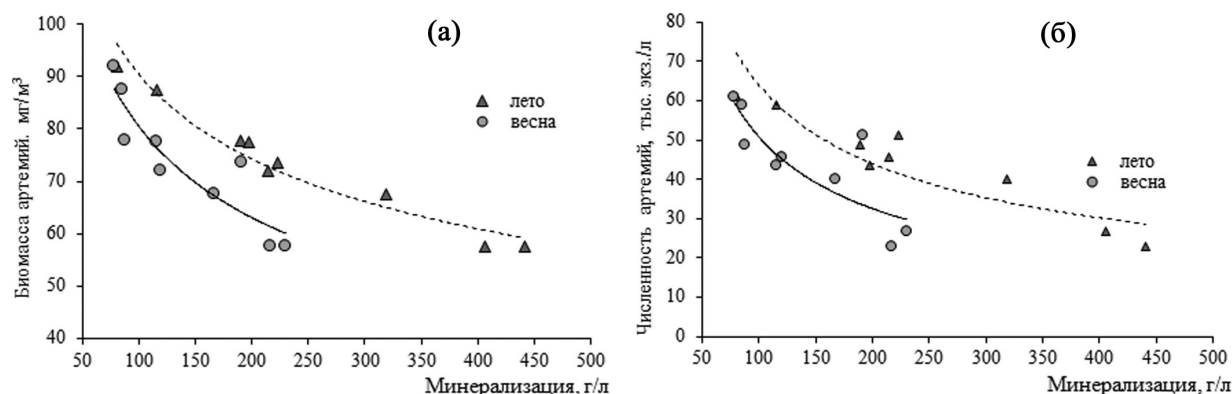


Рис. 4. Зависимость годовой биомассы и численности артемия от минерализации весной и летом (по: [Бамбеева и др., 2009])
Fig. 4. Dependence of annual biomass and population of *Artemia salina* on salinity in spring and summer (according [Бамбеева и др., 2009])

Были рассмотрены следующие варианты подачи воды в озеро:

- Вариант 1 – равномерная внутригодовая подача, т. е. ежемесячно в озеро подается одинаковое количество воды, независимо от месяца;
- Вариант 2 – подача воды акцентирована на холодные периоды (январь-февраль и ноябрь-декабрь);
- Вариант 3 – максимальная подача производится в теплый период (июнь-сентябрь).

На рис. 5 представлен внутригодовой ход минерализации вод озера для каждого из трех вариантов подачи воды. Как следует из рис. 5, все три варианта подачи воды практически обеспечивают равенство минерализации в начале и конце года, однако ее внутригодовой ход существенно различен. При равномерной подаче воды минерализация достигает величины 192 ‰ летом, при втором варианте подачи – 288 ‰, что в рамках принятых предположений несколько выше верхней границы. Третий вариант графика подачи воды в озеро обеспечивает удержание минерализации вод озера в пределе 100–150 ‰. При некоторой корректировке второй вариант может быть рекомендован к практическому использованию.

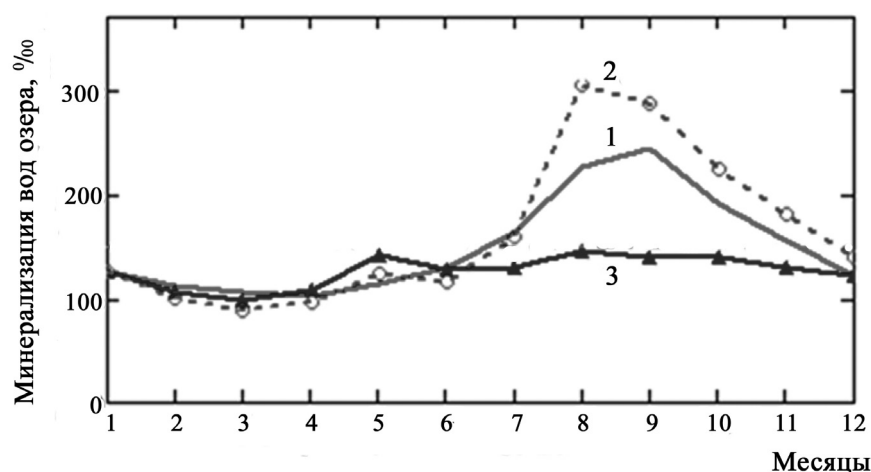


Рис. 5. Внутригодовой ход минерализации вод Большого Яшалтинского озера для трех вариантов подачи воды (1–3)
Fig. 5. The intra-annual salinity of Bol'shoe Yashaltinskoe Lake for the three options of water flow (1–3)

ВЫВОДЫ

На основе проведенных экспедиционных и камеральных исследований впервые построена батиметрическая карта Большого Яшалтинского озера. Впервые получены морфометрические и батиметрические зависимости между уровнем и площадью зеркала водоема, между уровнем и наполнением водоема, зависимость минерализации вод озера от наполнения озера. Наличие этих зависимостей в сочетании с методом географической аналогии и стохастическим моделированием векторного авторегрессионного процесса позволило провести моделирование водно-солевого баланса Б. Яшалтинского озера с месячным интервалом.

Были смоделированы 1000-летние реализации составляющих водного баланса озера – месячных величин осадков, испарения и притока, а также среднемесячных величин солености вод озера. Рассмотрены три варианта подачи воды в озеро. Показано, что оптимальная соленость, обеспечивающая комфортное существование озерного зоо- и фитопланктона и максимальную продуктивность *Artemia*, поддерживается таким режимом подачи воды в Большое Яшалтинское озеро, при котором вода в озеро дополнительно подается в феврале-марте и июне-сентябре.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ, проект № 14-17-00740.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for Humanities, project No 14-17-00740.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бамбеева В.И., Бакташева Н.М., Дедова Э.Б. Комплексная характеристика биоценоза гипергалинного водоема Калмыкии // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Серия Естественные науки. 2009. № 3. С. 20–24.
2. Егоров А.Н., Космаков И.В. География и природопользование соленых озер. М.; Новосибирск: Наука, 2010. 183 с.
3. Иванова В.И., Кониева Г.Н., Бакташева Н.М. Влияние экологических факторов на рост и продуктивность артемии в гипергалинных водоемах Калмыкии // Естественные науки. 2012. № 3. С. 51–55.
4. Литвиненко Л.И. Жаброногие рачки рода *Artemia* Leach, 1819 в гипергалинных водоемах Западной Сибири (география, биоразнообразие, экология, биология и практическое использование): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Пермь, 2009. 48 с.
5. Овчинников А.С., Бородычев В.В., Дедова Э.Б., Иванова В.И. Особенности экосистем соленых водоемов Калмыкии // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2015. № 4 (40). С. 10–21.
6. Фролов А.В., Выручалкина Т.Ю., Саркисян С.Г. Моделирование водно-солевого баланса Большого Яшалтинского озера // Водные ресурсы: изучение и управление (лимнологическая школа-практика). Материалы V Междунар. конф. молодых ученых. 2016. С. 388–395.
7. Фролов А.В., Выручалкина Т.Ю., Саркисян С.Г. Динамико-стохастическое моделирование водно-солевого баланса Большого Яшалтинского озера // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 3. С. 235–243.
8. Great Salt Lake. A Scientific, Historical and Economic Overview / Ed. by J. Wallace Gwinn. Utah department of natural resources. Bulletin 116. 1980. 400 p.

REFERENCES

1. *Bambeeve V.I., Baktasheva N.M., Dedova E.B.* Complex characteristics of biocenosis of Kalmykia hyperhaline water body. *Vestnik Mos. gos. obl. un. Seria Estestvennyye nauki.* 2009. No 3. P. 20–24 (in Russian).
2. *Egorov A.N., Kosmakov I.V.* Geography and nature management of salt lakes. M.; Novosibirsk: Nauka, 2010. 183 p. (in Russian).
3. *Frolov A.V., Vyrychalkina T.Yu., Sarkisyan S.G.* Modeling Water-Salt Balance of Bol'shoe Yashaltinskoe Lake. *Vodnye resursy: izuchenie i upravlenie (limnologicheskaya shkola-praktika).* Materialy V megdunarodnoi konferencii molodyh uchenykh, 2016. P. 388–395 (in Russian).
4. *Frolov A.V., Vyrychalkina T.Yu., Sarkisyan S.G.* Modeling Water and Salt Balance of Bol'shoe Yashaltinskoe Lake. *Water Resources.* 2018. V. 45, No 3. P. C. 235–243 (in Russian).
5. Great Salt Lake. A Scientific, Historical and Economic Overview / Ed. by J. Wallace Gwinn. Utah department of natural resources. Bulletin 116. 1980. 400 p.
6. *Ivanova V.I., Konieva G.N., Baktasheva N.M.* The influence of environmental factors on the growth and productivity of *Artemia* in the hyperhaline waters of Kalmykia. *Estestvennyye nauki.* 2012. No 3. P. 51–55 (in Russian).
7. *Litvinenko L.I.* Zhabronogie crustaceans of the genus *Artemia* Leach, 1819 in hyperhaline waters of Western Siberia (geography, biodiversity, ecology, biology and practical use): Auctoref. Dissertacii na soiskanie uchenoi stepeni doktora biologicheskikh nauk. Perm, 2009. 48 p. (in Russian).
8. *Ovchinnikov A.S., Borodychev V.V., Dedova E.B., Ivanova V.I.* The features of the ecosystem saline lakes of Kalmykia. *Izvestiya Nignevolgskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie.* 2015. No 4 (40). P. 10–21 (in Russian).

Занозин В.В.¹, Бармин А.Н.², Занозин В.В.³

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ

АННОТАЦИЯ

Ландшафтное картирование регионов продолжает оставаться важнейшей задачей современной географии. В последние десятилетия это направление широко использует в своих целях геоинформационные технологии. Проведение подобных исследований в центральной части ландшафта дельты Волги обусловлено рядом причин. Сюда относится сложность ландшафтной структуры региона, отсутствие современных картографических данных. В работе приводится краткая физико-географическая (ландшафтная) характеристика исследуемого региона. Рассмотрен вопрос об отсутствии в настоящее время возможности автоматического выявления границ естественных природных территориальных комплексов (ПТК). Представлено более двадцати основных единиц ландшафтного картографирования территории – видов урочищ, дано краткое описание некоторым из них. Отдельно изложены предпосылки для проектирования и развития ресурса с каталогом спектральных графиков ПТК центральной части дельты Волги. Спектрометрирование как отдельных элементов и компонентов, так и ПТК в целом становится одним из новых направлений исследования природы. Применение спектральных каталогов эталонных ПТК центральной части дельты Волги перспективно для решения научных и прикладных задач.

Одной из актуальных задач географии является ретроспективный анализ структурно-функциональных особенностей естественных («восстановленных») ландшафтов. Но несмотря на достигнутые успехи в области мелкомасштабного ландшафтного картографирования, остается нерешенной проблема наличия средне- и крупномасштабных картографических данных на регионы России. Сложившаяся ситуация не дает возможным проводить ретроспективный анализ структурно-функциональных особенностей естественных («восстановленных») ландшафтов, исследовать динамику и трансформацию геосистем под влиянием как природных, так и антропогенных факторов. Отсутствие средне- и крупномасштабных ландшафтных карт на территорию центральной части дельты Волги делает работу актуальной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ландшафт, ландшафтное картографирование, дельта Волги, ГИС, спектрометрирование естественных природных территориальных комплексов.

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет» (АГУ), ул. Татищева, 20а, Астрахань, Россия, *e-mail*: victorzan44@gmail.com

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет» (АГУ), ул. Татищева, 20а, Астрахань, Россия, *e-mail*: abarmin60@mail.ru

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет» (АГУ), ул. Татищева, 20а, Астрахань, Россия, *e-mail*: vvzanozin-67@mail.ru

Victor V. Zanozin¹, Alexander N. Barmin², Valery V. Zanozin³

THE GEOINFORMATION APPROACH IN THE ELECTION OF NATURAL TERRITORIAL COMPLEXES OF THE VOLGA RIVER DELTA

ABSTRACT

Regions landscape mapping continues to be the most important task of modern geography. In recent decades, this direction extensive use GIS technologies. Conducting similar studies in the central part of the landscape of the Volga Delta due to a number of reasons. There are complexity of the landscape structure of the region, the lack of modern mapping data. The paper presents a brief physical and geographical (landscape) characteristics of the studied region. The question about the lack automatically detect process the boundaries of the natural territorial complexes (NTCs) is examined. More than twenty basic units of landscape mapping of territory – types of tracts are presented, the brief description of some of them is given. The prerequisites for the design and development of the resource with a catalog of spectral graphs of NTCs of the Central part of the Volga Delta is considered. Spectrometry of both individual nature elements and nature components, and natural territorial complexes as a whole becomes one of new directions of research of the nature. Application of spectral catalogs of reference NTCs of the Central part of the Volga Delta is promising both for solving scientific and applied problems.

One of the topical problem of geography is retrospective analysis of structural and functional features of natural ("restored") landscapes. But despite the progress made in the field of small – scale landscape mapping, the problem of availability of medium-and large-scale mapping data for the regions of Russia remains unresolved. The current situation makes it impossible to carry out a retrospective analysis of the structural and functional characteristics of natural ("restored") landscapes, to study the dynamics and transformation of geosystems under the influence of both natural and anthropogenic factors. The absence of medium – and large-scale landscape maps on the territory of the Central part of the Volga Delta makes the work relevant.

KEYWORDS: landscape, landscape mapping, Volga river Delta, GIS, spectrometry of natural territorial complexes.

ВВЕДЕНИЕ

Принимая во внимание геологическую историю развития Прикаспийской низменности в плейстоцене и формирование ее ландшафтов в связи с климатическими условиями, в Прикаспийской низменности выделяют полупустынную и пустынную зоны.

На основании общности макрогеоструктуры, климатических условий и сформированных ландшафтов Астраханская область, как часть Прикаспийской низменности, входит в Прикаспийско-Туранскую равнинную страну.

Полупустынная и пустынная зона, Волга-Ахтубинская пойма и дельта из-за сходства геологического строения, геоморфологии, литологии и сформированных ландшафтов

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Astrakhan State University", 20a Tatischev str., Astrakhan 414056, Russia, *e-mail*: victorzan44@gmail.com

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Astrakhan State University", 20a Tatischev str., Astrakhan 414056, Russia, *e-mail*: abarmin60@mail.ru

³ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Astrakhan State University", 20a Tatischev str., Astrakhan 414056, Russia, *e-mail*: vvzanozin-67@mail.ru

составляют единую Прикаспийскую ландшафтную провинцию. С учетом геоморфологии, климата, фито- и зооценозов Прикаспийская провинция разделяется Волго-Ахтубинской поймой и дельтой на Волго-Уральскую и Терско-Волжскую подпровинцию.

Физико-географические районы выделяются по геоморфологическим особенностям строения территории, литологическому составу грунтов, на которых сформирован почвенно-растительный покров, залеганию грунтовых и наличию поверхностных вод, климатическим особенностям. В зависимости от литологического состава слагающих пород, степени их засоления, разрушительной и созидательной работы ветра в районах можно выделить подрайоны, в которых формируется сходная морфологическая структура ландшафта [Волинкин, 1969].

В пределах Астраханской области выделяются восемь физико-географических районов, или ландшафтов. В полупустынной зоне сформировались Волго-Сарпинский и Баскунчакский ландшафты. Пустынная зона представлена Волжско-Уральским, Волжско-Приергенинским, Западным и Восточным ильменно-бугровыми ландшафтами. К внутризональным относятся Волго-Ахтубинская пойма и дельта р. Волги. В каждом ландшафте выделяется несколько подрайонов или местностей с характерным для них набором урочищ. Что касается подрайонов, то в Баскунчакском районе можно выделить северный, южный и прибаскунчакский подрайоны. На три подрайона также разделена и Волго-Ахтубинская пойма: северная, центральная и южная. Волжско-Сарпинский и Волжско-Приергенинский делятся на два подрайона: северный и южный. Волго-Уральский ландшафт подразделяется на Харабалинско-Приахтубинский и Аксарайский подрайоны; западный ильменно-бугровой – на придельтовый и прикаспийский подрайоны [Занозин, 2006].

Сложность ландшафтной структуры дельты Волги во многом связана со сложными геологическим строением и геоморфологическим устройством района, что сделало достаточно проблемным вопрос его районирования, которому посвящено много работ [Мейснер, 1915; Валединский, Аполлов, 1928; Берг, 1951; Белевич, 1963].

Одно из последних районирований устья Волги представлено в Атласе дельты Волги. По морфологическим особенностям в дельте Волги от ее вершины к морскому краю его авторы четко выделяют три района: привершинный, центральный и приморский. Северная граница центрального (бугрового) района вновь проведена по линии Астрахань – Красный Яр. Он простирается на юг примерно до линии Оля – Каралат – Зеленга – Большой Могой – Котьяевка. Эта граница совпадает с местом бывшего свала глубин у морского края дельты, приуроченного к границе распространения первых пиков новокаспийской трансгрессии (около –25 м БС) [Атлас дельты Волги..., 2015].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ландшафтные карты долгое время считались в научном сообществе результатом исследований. Теперь же стало очевидным и доказанным, что ландшафтная карта должна не столько венчать исследование, сколько быть отправной точкой для дальнейших изысканий [Ямашкин, 2004]. Электронные ландшафтные карты должны обеспечивать обобщение комплексной информации, выработку емких научных концепций, обоснование принятия управленческих решений [Ямашкин, 2017].

Создание современной электронной ландшафтной карты подразделяется на несколько этапов, на каждом из которых в геоинформационной технологии реализуются определенные функции [Коновалова и др., 2005]. Для этого необходимо:

- составить характеристику основного объекта исследования и картирования по имеющимся литературным и фондовым материалам;

- на основе имеющихся литературных, картографических, фондовых источников и данных ДЗЗ составить первичную карту контуров природных территориальных комплексов (ПТК) ранга урочищ;
- провести полевые исследования ключевых участков;
- разработать классификацию изображаемых географических комплексов;
- выбрать метод картографирования и способ отображения географических комплексов;
- картировать рассмотренные ПТК в среде ГИС-программ;
- рассмотреть возможности дальнейшего исследования; выявить возможность практического применения полученных результатов.

На первом этапе исследований был спроектирован каталог данных исследуемой территории. В данном случае основой стали литературные источники, фондовые картографические материалы, доступные топографические карты в электронном виде, данные радарной топографической съемки (SRTM), данные планово-высотной основы и космические снимки.

На втором этапе проводится подготовка необходимых материалов для проведения экспедиционных работ и собственно полевые исследования. Так, были предварительно выделены границы геосистем ранга урочище. На основе web-геопортальных технологий по визуальному анализу структуры ландшафтного рисунка намечались ключевые участки и составлялся маршрут исследования.

Маршрутные исследования на территории центральной части ландшафта дельты Волги начались весной 2015 г. и продолжаются по настоящее время. В процессе полевых исследований проводятся ландшафтные описания ключевых участков, выполняется тщательная фотосъемка ПТК. Отдельно стоит отметить, что полевые исследования сочетаются с системами точного позиционирования и мобильными геолокационными приложениями. Такой симбиоз позволяет оперативно, непосредственно в процессе маршрута, записать пути исследования, сделать корректировки данных, оправить графические данные и текстовые материалы в лабораторию.

Третий этап включает в себя тщательную обработку данных полевых исследований в лабораторных условиях. Фотоматериалы группируются по датам, на основе полученных мобильных геолокационных приложений формируются интерактивные карты маршрутных исследований. Такие карты хранят в себе информацию о размерах обследованных ПТК, графики перепадов высот и собственно сами данные о высоте. Данные о высоте также выводятся из анализа моделей рельефа, топокарт и данных SRTM. Такой тщательный подход к изучению перепад высот обуславливается выделением ПТК как таковых. На основе космических снимков проводился анализ индикационных ландшафтно-структурных связей [Викторов, 1986]. Основной фонд данных дистанционного зондирования земли составили материалы с аппаратов Landsat и Sentinel 2. При анализе космоснимков для выявления рисунка ландшафта – границ ПТК – учитывались климатический, геолого-геоморфологический и временной факторы.

В качестве основного источника для предварительного ландшафтного картирования служили космические снимки общедоступной информационной системы Google Earth, обеспечивающей возможность просмотра обзорных изображений всей дельты на снимках со спутника Landsat (с разрешением 30 м) и перехода для детального дешифрирования хозяйственных объектов к появившимся с 2000 г. снимкам сверхвысокого разрешения (1–2 м) со спутников Ikonos, QuickBird, GeoEye. Дешифрирование экранных изображений выполняли при увеличении детальных снимков до масштаба 1 : 5000 – 1 : 10 000, а результаты дешифрирования фиксировали на отпечатках обзорных снимков в масштабе 1 : 100 000.

Существенную роль при выявлении природных комплексов оказывает фондовый картографический материал.

Работы по картированию ПТК, дешифрированию космических снимков осуществляются в среде ГИС QGIS и ПК Image Media Center, разрабатываемых ООО «Центр инновационных технологий» (Москва).

На последнем этапе реализуется проверка данных, их систематизация для типизации выделов при создании ландшафтной карты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку территория исследований претерпела существенную антропогенную трансформацию, при реконструкции ландшафтной структуры территорий необходимым является применение ландшафтно-эдафического подхода [Низовцев, Марченко, 2004].

Суть его заключается в составлении карты условно-восстановленных (коренных) ПТК, которая показывает приближенное к первичному распределение элементарных ландшафтных единиц.

Переход от современной к восстановленной ландшафтной структуре представляет особую огромную методическую сложность в условиях длительного антропогенного освоения территории исследований, определяющего значительную трансформацию почвенно-растительного покрова [Идрисов, Сизов, 2017].

Активно развивающийся рынок использования данных дистанционного зондирования, безусловно, призван решать практические задачи, в том числе и в ландшафтоведении. Однако ни одна из операций, номинируемых как «методы», не предполагает выявления структуры природного ландшафтного покрова Земли [Колбовский, 2013].

Классификация изображений – процесс извлечения классов информации из многоканального растрового изображения – для задачи выявления, типизации и картирования ПТК не представляет собой методически верного решения *автоматического* выявления естественных ПТК. Классификация осуществляется непосредственно на основе пространственно-временных данных снимка, в результате чего выделяется ландшафтный покров.

Таким образом, проблема машинного выделения естественных ПТК остается открытой. Возможно, решение данного вопроса кроется в глубинах концепции Цифровой Земли, в семантико-сегментационном (или лучше семиотико-сегментационном) подходе: пути смысловой классификации пикселей и преобразования ареала пикселя одного класса в полигоны (грид-шейп). Исследования в этой области очевидно новы и междисциплинарны и имеют как безусловное теоретическое значение, так и практическую направленность и актуальность. Парадоксальные свойства изображений, данных дистанционного зондирования, выявление семиотической проблематики в Цифровой Земле стали актуальными вопросами в 2017 г. [Ерёмченко, 2017] и, скорее всего, остаются по сей день.

Изучение спектральных отражательных свойств ландшафта в настоящее время остается ключевым пунктом в исследовании природной среды методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Спектральные характеристики объектов Земли являются ценнейшим компонентом при проектировании съемочных систем, они используются для обработки данных ДЗЗ, необходимы при дешифрировании космических снимков. На сегодняшний день в России отсутствуют общедоступные спектральные каталоги на регионы страны, которые позволили бы повысить точность анализа данных ДЗЗ в научных и прикладных задачах. Таким образом, есть все предпосылки для проектирования и развития ресурса с каталогом спектральных графиков ПТК центральной части дельты Волги (рис. 1).

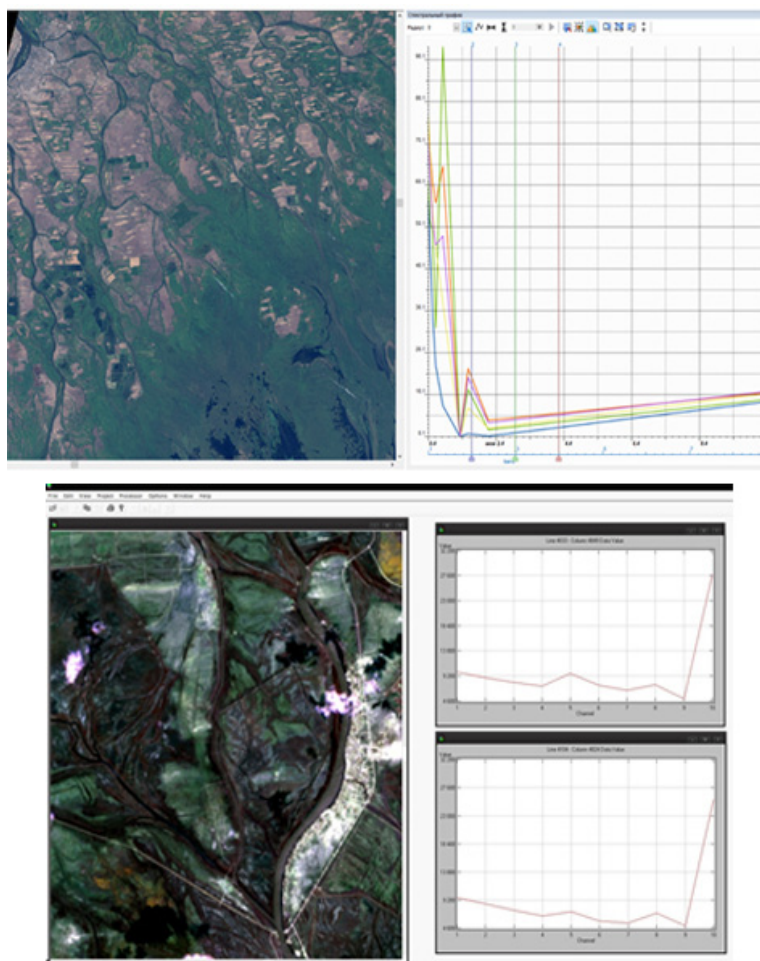


Рис. 1. Совершение операций спектрального анализа:
А – в ПК Image Media Center; Б – в программе MultiSpec

Fig. 1. Performing spectral analysis operations:
А – in Image Media Center program complex; Б – in MultiSpec software

Проектируемые векторные данные создаются в системе координат WGS84. Это необходимо для открытия слоев в Google Earth (рис. 2), а также в случае экспорта данных на геопортал, разработка которого обсуждалась ранее [Занозин, 2016]. При необходимости векторные данные будут переконвертированы.

Несмотря на возникшие трудности, проводить работу по анализу и картографированию естественных ПТК удастся благодаря использованию ручного дешифрирования, обеспечивающего высокую достоверность результата, особенно с учетом необходимости восстановления исходной структуры и границ ПТК.

Известно, что отображение географического комплекса может быть выполнено двумя способами, а именно аналитическим или синтетическим. При аналитическом способе все географические компоненты (рельеф, почвы, растительность и др.) будут отображены на итоговой карте отдельно. Такие картографические изображения наглядно отображают соотношения природных компонентов, однако мы не увидим на данных картах ПТК как таковых. При синтетическом ландшафтом картографировании, которое используется в данной работе (рис. 3), на карту наносятся сами географические комплексы того или иного ранга в единой системе условных обозначений. Таким картам свойственны наглядность, простота исполнения, подлинно синтетический характер [Исаченко, 1961].



Рис. 2. Рабочее окно программы Google Earth с нанесенными слоями, отражающее естественные ПТК на территорию г. Астрахани
Fig. 2. Working window of the Google Earth program with the applied layers reflecting NTCs on the territory of Astrakhan city

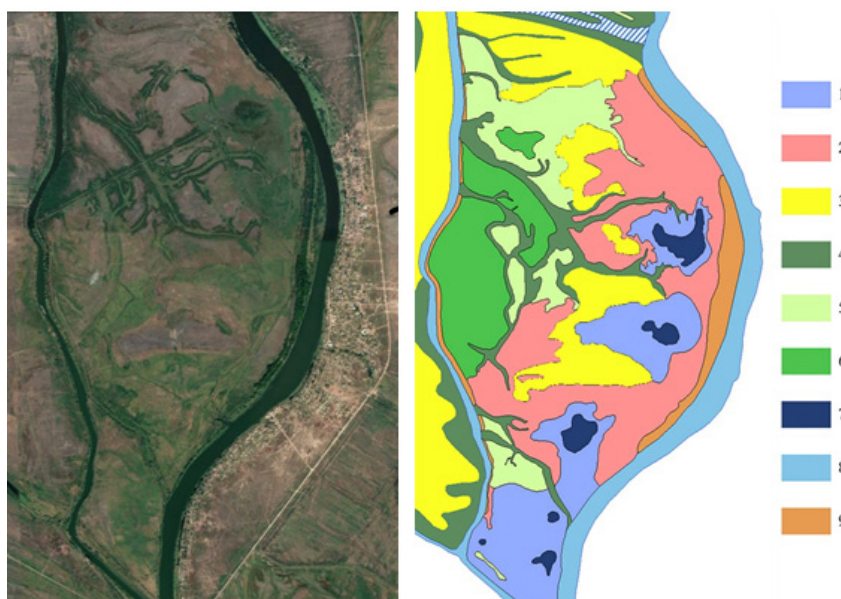


Рис. 3. Фрагмент ландшафтной карты центральной части дельты Волги, М. 1 : 100 000 (вблизи населенного пункта Образцово-Травино) на основе анализа космоснимка и полевых исследований:

1 – култу́чная равнина низкого уровня; 2 – култу́чная равнина среднего уровня; 3 – култу́чная равнина высокого уровня; 4 – русловая мелкогравистая равнина низкого уровня; 5 – русловая мелкогравистая равнина среднего уровня; 6 – русловая мелкогравистая равнина высокого уровня; 7 – култу́чный ильмень; 8 – водоток; 9 – прирусловой вал

Fig. 3. Fragment of the landscape map of the central part of the Volga river delta (based on the key area Obrastsovo-Travino):

1 – low level limnic (kultuc) plain; 2 – middle level limnic (kultuc) plain; 3 – limnic (kultuc) high level plains; 4 – channel shallow low-level plain; 5 – channel shallow plain (average level); 6 – channel fine-grained plain of high level; 7 – limnic (kultuc) lake; 8 – watercourse; 9 – natural levee (channel bank)

Основными единицами ландшафтного картографирования центральной части дельты Волги являются виды урочищ. Так, было выделено более 20 видов урочищ. Среди них: русловые ильмени, култучные ильмени, межбугровые ильмени, русловые пологоволнистые равнины среднего уровня, култучные гривистые равнины низкого уровня, межбугровые котловины, русловые равнины высокого уровня с ленточными лесами, бугры Бэра, бугровые шельфы, русловые гривистые равнины, межбугровые равнины пологовогнутые, гривистые равнины пологовогнутые высокого и среднего уровней на морских островах, русловые равнины мелкогривистые высокого уровня, култучные равнины высокого уровня, култучные равнины среднего уровня пологовогнутые, култучные равнины гривистые среднего уровня, русловые равнины мелкогривистые среднего уровня, култучные равнины низкого уровня, русловые мелкогривистые равнины низкого уровня, култучные равнины среднего уровня, русловые пологовогнутые равнины низкого уровня, прирусловые валы.

Основой островов данной части дельты, их своеобразным каркасом, служат сложные урочища бугры Бэра. Бэровские бугры во многом определяют сложный рисунок гидрографической сети данной местности. Выступая в роли своеобразных преград, они способствуют разветвлению, соединению и образованию излучин у различных водотоков. Рост островов центральной части дельты Волги проходил также в результате осушения култуков – мелководных морских заливов дельты. Култуки, постепенно мелея, заполнялись осадками реки и моря, зарастая по краям влаголюбивой растительностью. Постепенно они превращались в култучную равнину с пологовогнутой поверхностью и прирусловыми валами по краям.

В центре култучного острова образуется култучный ильмень, который постепенно заиляется и превращается в култучноравнинное урочище низкого уровня с избыточным увлажнением. С поверхности оно сложено послойными отложениями, а на глубине 30–40 см формируются култучные отложения. Култучноравнинные урочища среднего уровня занимают относительно повышенные и наиболее выровненные участки. Эти урочища отличаются от култучноравнинных урочищ низкого уровня большей мощностью послойных отложений и глубиной залегания култучных отложений (100–150 см).

Мелкогривистые островные урочища представляют собой сочетание грив и понижений, которые заполняются осадочным материалом в период половодья. Высота грив достигает 1,5–2,0 м, а глубина понижений – до 1 м. В процессе накоплений речных отложений происходит выравнивание поверхности и остаются только верхние части грив – так формируется мелкогривистый рельеф. Гривы обычно сложены переслаиванием песков и супесей. Понижения между ними с поверхности представлены суглинками.

Мелкогривистые островные урочища в зависимости от длительности половодья подразделяются на урочища низкого, среднего и высокого уровней. Мелкогривистые урочища низкого уровня имеют высоту грив от 1,0 до 1,5 м. Грунтовые воды залегают на глубине от 1,76 до 2,50 м. Почвенный покров представлен пойменными луговыми слоистыми и темноцветными почвами. Растительность данных урочищ представлена злаково-разнотравными ассоциациями.

Мелкогривистые урочища среднего уровня занимают участки с относительной высотой 1,5–2,5 м. Полыми водами они заливаются достаточно редко. Грунтовые воды залегают глубоко (2,0–2,5 м), поэтому данные урочища обычно не подвержены подтоплению. Вдоль русел водотоков в дельте часто можно увидеть вытянутые повышения. Это так называемые прирусловые валы [Карабаева и др., 2012; Занозин и др., 2017].

ВЫВОДЫ

Использование современных ГИС-технологий при ландшафтном картографировании позволяет оптимально организовать полевые исследования и дешифрирование космических снимков, создать комплексную информационную систему представления территории, систематизировать процесс проектирования картографического материала.

Следует подчеркнуть дополнительно, что картографирование естественных ПТК центральной части дельты Волги наиболее оправдано при применении ручного дешифрирования. Автоматизированные методы (контролируемой и неконтролируемой классификации) служат в качестве ценного источника дополнительной информации по свойствам современной ландшафтной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атлас дельты Волги: геоморфология, русловая и береговая морфодинамика.* М.: АПР, 2015. 128 с.
2. *Берг С.Л.* Объяснительная записка к литолого-морфологической карте дельты Волги // Тр. Гос. океанограф. ин-та. Вып. № 18 (30). Л., 1951.
3. *Белевич Е.Ф.* Районирование дельты Волги // Тр. Астраханского заповедника. 1963. Вып. 8. С. 401–421.
4. *Валединский В.В., Аполлов Б.А.* Дельта реки Волги (по данным изысканий 1919–1925 гг.) // Труды отдела портов и управления внутренних водных путей. Вып. 5, т. 1. Тифлис, 1928. 661 с.
5. *Викторов А.С.* Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.
6. *Волынкин И.Н.* Ландшафтная карта и ландшафтное районирование Астраханской области // Учен. зап. Астраханского гос. пед. ин-та им. С.М. Кирова. Т. 16. Вопросы географии. Астрахань, 1969. С. 119–135.
7. *Ерёмченко Е.Н.* От карт прошлого к не-картам будущего: обзор событий и концепций // От карты прошлого – к карте будущего: Сб. науч. тр. В 3-х т. / Отв. ред. С.В. Пьянков; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2017. Т. 2. С. 62–73.
8. *Занозин В.В.* Ландшафтно-рекреационный анализ Астраханской области. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2006. С. 66–69.
9. *Занозин В.В.* К вопросу о создании ландшафтной web-ГИС Астраханской области // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего: Сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. (10–11 августа 2016 г.). Т. II. Кемерово: ЗапСибНЦ, 2016. С. 51–53.
10. *Занозин В.В., Бармин А.Н., Занозин В.В.* Особенности спектрометрирования природных территориальных комплексов // Геология, география и глобальная энергия. 2017а. № 4 (67). С. 149–155.
11. *Занозин В.В., Занозин В.В., Бармин А.Н.* Ретроспективный анализ структурно-функциональных особенностей естественных природно-территориальных комплексов // Геология, география и глобальная энергия. 2017б. № 2 (5). С. 104–110.
12. *Идрисов И.Р., Сизов О.С.* Ландшафтные карты для целей археологических исследований // От карты прошлого – к карте будущего: Сб. науч. тр.: В 3-х т. / Отв. ред. С.В. Пьянков; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2017. Т. 1. С. 113–120.
13. *Исаченко А.Г.* Физико-географическое картирование. Ч. III. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1961. С. 27–30.
14. *Карабаева А.З., Быстрова И.В., Занозин В.В., Карабаева О.Г.* Характеристика морфологической структуры урочищ интразонального ландшафта центральной части дельты Волги // Естественные науки. 2012. № 3. С. 55–59 (Астрахань, Издательский дом «Астраханский университет»).

15. Колбовский Е. Ю. «Неоландшафтоведение», или нерешенные вопросы теории классической географии (Ч. 2) // Ярославский педагогический вестник. 2013. № 2, т. III (Естественные науки). С. 128–129.
16. Коновалова Т.И., Бессолицына Е.П., Владимиров И.Н. и др. Ландшафтно-интерпретационное картографирование / Отв. ред. А.К. Черкашин. Новосибирск: Наука, 2005. С. 169–171.
17. Мейснер В.И. Дельта Волги. Отчет о работах экспедиции по обследованию дельты р. Волги в 1914 г. // Материалы к познанию русского рыболовства. 1915. Т. IV, вып. 10. С. 23–60.
18. Низовцев В.А., Марченко Н.А. Антропогенный ландшафтогенез – методы и результаты исследований // Функционирование и современное состояние ландшафтов. М.: Городец, 2004. С. 196–213.
19. Ямашкин А. А. Геоинформационные технологии в ландшафтном планировании и прогнозировании деструктивных геоэкологических процессов // Мордовия: наука, инновации, новые технологии. 2004. № 2. С. 16–21.
20. Ямашкин А. А. Синтетическое ландшафтное картографирование в региональной ГИС // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 04 (58), ч. 1. С. 54–56.

REFERENCES

1. *Atlas of the Volga Delta: geomorphology, river and coastal river rift morphodynamics*. M.: APR, 2015. 128 p. (in Russian).
2. Berg L.S. Explanatory notes to the litho-morphological map of the Volga Delta. Tr. Gos. okeanografii. inta. No 18 (30). L., 1951 (in Russian).
3. Belevich E.F. Zoning of the Volga Delta. Tr. Astrakhanskogo zapovednika. 1963. V. 8. P. 401–421 (in Russian).
4. Eremchenko E.N. From maps of the past toward non-maps of the future: an overview of events and concepts. Ot karty proshlogo – k karte budushchego: sb. nauch. tr.: v 3 t. / Отв. ред. S.V. Piankov; Perm. gos. nats. issled. un-t. Perm, 2017. V. 2. P. 62–73 (in Russian).
5. Idrisov I.R., Sizov O.S. Landscape maps for archaeological research purposes. Ot karty proshlogo – k karte budushchego: sb. nauch. tr.: v 3 t. / Отв. ред. S. V. Piankov; Perm. gos. nats. issled. un-t. Perm, 2017. V. 1. P. 113–120 (in Russian).
6. Isachenko A.G. Physical and geographical mapping. Part III. L. Publishing house of the Leningrad University, 1961. P. 27–30 (in Russian).
7. Karabaeva A.Z., Bystrova I.V., Zanozin V.V., Karabaeva O.G. Characteristics of the morphological structure of the tracts intrazonal landscape of the Central part of the Delta of the Volga. Estestvennyye nauki. Astrakhan: Izdatelskiy dom "Astrakhanskiy universitet", 2012. No 3. P. 55–59 (in Russian).
8. Kolbowski E.Y. "Neolandscape Science" or Unresolved Questions of the Classical Geography Theory (Part 2). Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik. 2013. No 2, V. III (Natural Sciences). P. 128–129 (in Russian).
9. Konovalova T. I., Bessolitsyna E.P., Vladimirov I.N. et al. Landscape interpretation mapping / Отв. ред. А. К. Черкашин. Novosibirsk: Nauka, 2005. P. 169–171 (in Russian).
10. Meisner V.I. Volga Delta. The report on the work of the expedition for the survey of the Delta of the Volga river in 1914. Materialy k poznaniyu russkogo rybolovstva. 1915. T. IV, V. 10. P. 23–60 (in Russian).
11. Nizovtsev V.A., Marchenko N.A. Anthropogenic landscape Genesis – methods and research results. Funktsionirovaniye i sovremennoye sostoyaniye landshaftov. M.: Gorodets, 2004. P. 196–213 (in Russian).

12. *Valedinsky V.V., Apollov B.A.* Delta of the Volga river (according to surveys of 1919–1925). *Trudy otдела portov i upravleniya vnutrennikh vodnykh putey*. V. 5, t. 1. Tiflis, 1928. 661 p. (in Russian).
13. *Viktorov A.S.* The picture of the landscape. Moscow: Mysl, 1986. 179 p. (in Russian).
14. *Volynkin I. N.* Landscape map and landscape zoning of the Astrakhan region. *Uchenyye zapiski Astrakhanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo instituta imeni S.M. Kirova*. V. 16. Geography issues. Astrakhan, 1969. P. 119–135 (in Russian).
15. *Zanozin V.V.* To the issue of landscape web-GIS creation in Astrakhan region. *Nauchno-tekhnicheskii progress: aktualnyye i perspektivnyye napravleniya budushchego: sbornik materialov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (August 10–11, 2016). V. II. Kemerovo: Zapsib, 2016. P. 51–53 (in Russian).
16. *Zanozin V.V.* Landscape and recreational analysis of the Astrakhan region. Astrakhan: publishing house "Astrakhan University", 2006. P. 66–69 (in Russian).
17. *Zanozin V.V., Barmin A.N., Zanozin V.V.* Features of spectrometry of natural territorial complexes. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya*. Scientific and technical journal. 2017. No 4 (67). P. 149–155 (in Russian).
18. *Zanozin V.V., Zanozin V. V., Barmin A. N.* A retrospective analysis of structural and functional features of natural-territorial complexes. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya*. Scientific and technical journal. 2017. No 2 (5). P. 104–110 (in Russian).
19. *Yamashkin A. A.* Geoinformation technologies in landscape planning and prediction of destructive geoeological processes. *Mordoviya: nauka, innovatsii, novyye tekhnologii*. 2004. No 2. P. 16–21 (in Russian).
20. *Yamashkin A. A.* Synthetic landscape mapping in regional GIS. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2017. No 04 (58). V. 1. P. 54–56 (in Russian).

Шурыгина А.А.¹, Самсонов Т.Е.²

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ГРАФОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В РАСПОЗНАВАНИИ СЕТЕЙ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ

АННОТАЦИЯ

Представляемая работа является частью исследования, которое направлено на выявление подходов к распознаванию пространственных объектов по векторным моделям данных. На предыдущем этапе классификация объектов основывалась на наборе их морфометрических признаков, – был сделан вывод о недостаточности подобных характеристик для автоматизированного распознавания и необходимости дополнительного изучения пространственных взаимосвязей объектов, т. е. перехода от объектного уровня распознавания к классовому, от анализа формы объектов к исследованию сочетаний форм – рисунков. Важно рассмотреть пространственные взаимосвязи как объектов одного класса, так и разных. В рамках текущей работы решалась задача классификации групп пространственных объектов различных классов.

В статье описаны направления использования результатов исследования, методика решения поставленной задачи, материалы, задействованные в работе. Проведено сравнение результатов классификации объектов по морфометрическим и графовым признакам.

Представлены подходы к автоматизированному распознаванию природных и антропогенных объектов линейной локализации на векторной модели данных. Применена теория графов и элементы машинного обучения для их классификации. Результатом работы стал инструмент, разработанный на языке программирования Python, который конвертирует сеть линейных объектов в граф и рассчитывает определенный перечень его параметров. Также в программном продукте **Rapid Miner Studio** подготовлена модель для машинного распознавания сетей автомобильных и железных дорог, рек, каналов. Тестирование разработанной технологической схемы проводилось на цифровых данных трех уровней детализации и шести типов ландшафтов, чтобы оценить устойчивость алгоритмов к генерализации данных и изменчивости рисунков сетей в различных природных условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: машинное обучение, распознавание графических образов, теория графов.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: shur.a17@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru

Anastasia A. Shurygina¹, Timofey E. Samsonov²

RECOGNITION OF NATURAL AND ANTROPOGENIC NETS BASED ON THE GRAPH THEORY AND METHODS OF MACHINE LEARNING

ABSTRACT

Current study is a part of the research which is aimed at identifying approaches to the recognition of spatial data objects presented in the vector data models. In the previous stage the classification of spatial objects was based on the set of their morphometric features – shape characteristics. A conclusion was drawn that such attributes were insufficient for automated recognition and there was a need in additional study of the spatial relationships of objects. That means the transition from the object recognition level to the feature classes recognition level, from shape analysis to the exploration of objects combinations – patterns. It is important to analyse spatial relationships between objects of the same classes as well as different ones. That study covers the problem of classifying various feature classes.

Application options of the study results are described in the paper on a par with the methodology of solving the task and materials involved in the study. Moreover, the results of objects recognition based on their morphometric features and graph characteristics are compared.

The paper presents the ways of automated recognition of natural and antropogenic vector objects with the linear localization. The study applies Graph theory and Machine learning to classify them. The Python script for calculating graph parameters of linear objects was created. Furthermore, the model in Rapid Miner Studio application program was prepared for spatial objects' nets recognition.

KEYWORDS: graph theory, machine learning, pattern recognition.

ВВЕДЕНИЕ

Теория распознавания образов, занимающаяся классификацией групп графических объектов на основе заданных признаков [Лурье, Косиков, 2003], находит сегодня многоаспектное практическое применение. Распознавание объектов на растровых моделях представления данных входит в перечень задач цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования. Развитие технологий распознавания в картографии является одним из факторов создания системы полностью автоматизированного составления карт, что важно в первую очередь для их оперативного обновления и укладывается в концепцию Цифровой Земли. Исследования в этом направлении проводятся, например, компаниями Facebook и DigitalGlobe, о чем упоминается в статье Е. Лисовского «Искусственный интеллект и нейросети в картографии»³.

Задача распознавания пространственных объектов на векторных моделях также актуальна. Накопление знаний об особенностях геометрических и структурных признаков (формы и рисунка) объектов дополнит методы классификации растровых изображений, сделает возможным создание системы контроля автоматизированного и краудсорсингового наполнения картографических баз данных (как геометрической составляющей, так и семантической), позволит генерировать картографические образы геосистем заданных свойств.

Цель работы – определить способы формализованного описания сетей линейных пространственных объектов для их автоматизированного распознавания методом машинного обучения с целью решения геоинформационных задач, связанных с распознаванием пространственных образов.

¹ Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: shur.a17@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru

³ URL: <http://www.forbes.ru/tehnologii/351121-iskusstvennyy-intellekt-i-neyroseti-v-kartografii-2-kogda-narodnye-karty-kruche> (дата обращения 06.12.17).

Достижение цели осуществлялось в несколько этапов:

- Определение набора исследуемых характеристик классов объектов как графов и разработка на языке программирования Python специализированных инструментов для вычисления их значений.
- Создание тестового набора линейных пространственных объектов разных классов и применение к ним разработанного инструмента анализа.
- Подготовка модели в специализированном программном продукте для машинного распознавания выбранных классов на основе обучающей выборки.
- Формулирование выводов об эффективности использованного подхода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Природные и антропогенные объекты, которые на общегеографических картах изображаются линейным знаком, можно воспринимать как неориентированный граф. Например, дорожная сеть состоит из перекрестков – вершин и собственно дорог – рёбер.

Во многих прикладных задачах, в которых графы используются как модели определенных явлений, требуется анализ положения некоторых вершин относительно остальных: определение центра сети, кратчайшего расстояния между двумя вершинами, возможности проложить путь между заданными вершинами и др. Вследствие этого математика предлагает широкий аппарат для анализа взаиморасположения элементов графа, характеристик его составных частей, нежели графовой структуры целиком.

В рамках решаемой в работе задачи необходим именно целостный подход к описанию пространственных сетей, поскольку перекрестки, места слияния рек, железнодорожные узлы и фрагменты дорог и водотоков между ними по отдельности не несут информации об особенностях явлений, не характеризуют рисунок явлений, потому что являются его фрагментами. Кроме того, ранее была исследована возможность использования такого признака, как среднее арифметическое индексов узлов графов (сетей линейных объектов общегеографических карт): будучи признаком, обобщающим характеристики отдельных элементов графа, он не позволил качественно различать сети – необходимы более сложные характеристики, опирающиеся на свойства графа как абстрактной модели.

Из общих свойств графа в работе использованы: *средний коэффициент кластеризации* (отражает полноту связей в сети); *транзитивность сети* – отношение числа всех возможных треугольников, которые могут быть образованы тремя узлами и тремя ребрами, к числу присутствующих в сети триад – структур, состоящих из трех узлов и двух ребер [Schank, Wagner, 2004]; *плотность графа*,

$$D = \frac{2 \cdot e}{v \cdot (v - 1)}$$

где e – количество ребер в графе, v – число вершин; *коэффициент ассортативности*, характеризующий наличие явления тяготения узлов с большими степенями друг к другу [Newman, 2003]; число *компонент связности* графа – частей графа, в пределах которых возможно проложить путь из любой вершины в любую другую [Reingold, 2008].

Природные и антропогенные сети в пространственных базах данных хранятся в виде упорядоченного набора объектов, например, рек. Все реки обязательно имеют две точки – исток и устье, причем значительное число рек обладает притоками, устьевые точки которых расположены на принимающих водотоках. Для того чтобы представить речную сеть в виде графа, необходимо все точки истоков и устьев принять за его узлы, а участки водотоков между ними – за ребра графа. Следовательно, возникает задача предварительной подготовки данных, а именно: выделение всех пар указанных точек и разрезание в них объектов более высокого порядка (крупных рек в местах впадения притоков).

Для ее решения был создан программный код на языке программирования Python, использующий функциональность библиотеки *arcpy* и позволяющий сформировать таблицу, в которой каждому фрагменту между двумя точками пересечения линий (ребру будущего графа) поставлены в соответствие идентификационные номера его концевых точек (узлов) и длина.

Таблица становится исходным материалом для работы программного кода, реализованного на языке Python: на ее основе строится граф. Далее к нему применяются готовые методы библиотеки *NetworkX* и авторские функции и рассчитанные характеристики графа записываются в таблицу MS Excel.

В программном пакете Rapid Miner Studio, который работает с табличными данными, подготовлен шаблон модели для классификации объектов по ограниченному набору признаков. Ядром модели является инструмент голосования нейронной сети и дерева решений.

Решающие правила создавались на основе обучающей выборки, в качестве которой использовались сети автомобильных и железных дорог, речная сеть и сеть каналов территории Московской области, Республики Коми, Алтайского края в трех масштабах (1 : 10 000, 1 : 100 000 и 1 : 1 000 000), фрагментов территории Республики Карелия, Республики Дагестан, Камчатского края и Самарской области в двух масштабах (1 : 10 000 и 1 : 1 000 000) – всего 58 наборов. Так как многие из используемых коэффициентов интуитивно кажутся близкими по смыслу и есть вероятность линейной связи их значений для тестовых наборов данных, был проведен попарный корреляционный анализ полученных рядов данных – наибольшая связь обнаружена между значениями коэффициентов транзитивности и кластеризации – 0,5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе обучающей выборки была выявлена значимость каждого атрибута при классификации (в порядке убывания): транзитивность, кластерность, количество компонентов, ассортативность и плотность.

Построено дерево решений (рис.): в узлах указан признак разбиения, на его ребрах – границы классов, листья – итоговые классы. Ширина полосы под названием класса говорит об относительном числе объектов, пришедших при распознавании именно к этому листу, а цвета – о том, правильно ли они были распознаны, много ли ошибочных решений в данном листе. Видно, что главным признаком железнодорожных сетей является относительно высокая степень кластеризации – наличие разрозненных уплотнений сети, узлов, вокруг которых возрастает интенсивность железнодорожного сообщения. Однако на территориях, где его концентрация уменьшается, железные дороги иногда принимаются за автомобильные. Низкой кластерностью и транзитивностью отличаются реки, потому что для речной сети не характерно явление сосредоточения вокруг некоторого узла, только близ нескольких ребер, составляющих водоток высшего порядка. Также им не свойственна транзитивность – наличие треугольников. Тем не менее речные сети равнинных обводненных территорий, с множеством протоков, могут по признаку транзитивности быть распознанными как каналы, отличающиеся низкой кластерностью и высокой транзитивностью. Основным свойством автомобильных дорог выступает их транзитивность – наличие альтернативных маршрутов между пунктами. Из этого следует повышенная плотность и сниженная относительно железнодорожной сети кластерность таких сетей.

Учитывая, что выборка была составлена из сетей разного уровня генерализации и типов ландшафтов и на ее основе было получено компактное дерево решений, можно рассматривать графовые свойства природных и антропогенных сетей как значимые дополнительные признаки при их распознавании.



Дерево решений для классификации линейных пространственных объектов
по графовым признакам

The decision tree for the classification of linear spatial objects by graph characteristics

Следующий возникающий вопрос – корректно ли признаки линейных объектов как графов анализировать совместно с их морфометрическими характеристиками? С одной стороны, значения графовых свойств рассчитываются для совокупности аналогичных типов пространственных объектов, а не для каждого объекта в отдельности (как это выполнялось для морфометрических расчётов), поэтому в случае их распространения на элементы сети обучающая выборка станет нерепрезентативной, потому что такие атрибуты будут однозначно идентифицировать класс объекта и не будут давать диапазон значений, в пределах которого может находиться признак, что затруднит классификацию произвольных объектов. С другой стороны, задача используемых алгоритмов распознавания заключается не в соотношении атрибутов неклассифицированных объектов с вариациями значений соответствующих признаков обучающей выборки, а в нахождении границ классов в признаковом пространстве. Поэтому наличие констант в векторах признаков объектов не должно влиять на качество работы алгоритмов.

Для исследования влияния наличия графовых признаков на результат классификации использовались выборки из линейных классов объектов цифровых топографических карт масштабов 1 : 10 000, 1 : 100 000 и 1 : 1 000 000 на территорию Московской области. В атрибутивные таблицы исходных классов пространственных объектов были добавлены поля, отвечающие за графовые характеристики, и рассчитаны морфометрические (извилистость отдельных линий, ортогональность, схематичность [Шурыгина, Самсонов, 2017]). Данные региона были условно разделены на две зоны – северо-западную и юго-восточную. Для каждой половины графовые показатели рассчитывались отдельно. Из данных первого фрагмента формировались обучающие выборки, по данным второго – наборы для тестирования моделей обучения.

Основная тенденция после добавления новых, графовых, признаков для распознавания заключается в смещении значимости характеристик в сторону графовых параметров: ассортативность, кластерность и число компонент теперь входят в пятерку важнейших признаков классификации по оценке моделей машинного обучения. Достоверность распознавания тестовых объектов имеет две особенности. При первичной классификации экспериментальных данных правильность распознавания практически всех групп выборок имела более низкое (в пределах нескольких десятков процентов) значение, чем при работе моделей только по морфометрическим признакам. В то же время путем подбора усеченной группы параметров практически для всех выборок удалось найти такое сочетание характеристик, которое позволяет классифицировать независимые данные с абсолютной достоверностью. Однако такие наборы индивидуальны для каждой группы классов объектов, их сложно унифицировать даже в пределах одного масштаба. Как правило, перечень необходимых и достаточных признаков содержит некоторые графовые характеристики (в первую очередь ассортативность) и 1–2 морфометрические.

Объекты масштаба 1 : 10 000 успешно распознавались всего лишь по двум параметрам – ассортативности и количеству компонент. Единственный набор данного масштаба,

качество классификации которого не удалось довести до 100 %, состоит из классов рек, каналов, автомобильных и железных дорог (каналы относились к железным дорогам). Тем не менее полученный результат улучшился по сравнению в предыдущим этапом исследования: достоверность повысилась с 59 до 77 %.

В более мелком масштабе абсолютной достоверности также не удалось достичь только в самой крупной по числу классов группе. Наиболее важными признаками в данной масштабной совокупности стали ассортативность и кластерность. Относительно часто использовались длина линии и ее фрактальная размерность. Ранее ключевыми признаками объектов двух крупнейших масштабов выступали схематичность, замкнутость линии, ее длина, фрактальная размерность и извилистость.

Наконец, в масштабе 1 : 1 000 000 повышена распознаваемость группы из всех доступных линейных объектов; не изменилась достоверность классификации набора «реки, авто- и железные дороги» (83 %). Остальные совокупности успешно распознавались по признакам ассортативности и кластерности, часто задействовались показатели извилистости и длины линий, реже – ортогональности, фрактальной размерности и плотности графа. Ранее объекты данной масштабной группы классифицировались алгоритмом по схожему набору морфометрических характеристик: схематичность, ортогональность, извилистость, длина линии и замкнутость.

Проведенный эксперимент показал, что рассмотрение линейных пространственных объектов как графов может значительно повысить качество их распознавания и что допустимо составлять векторы признаков объектов как из индивидуальных морфометрических показателей, так и из общеклассовых графовых. Однако обучение и верификация моделей проводились на однотипных по виду рисунка территориях, графовые признаки которых действительно близки, и успешным распознавание объектов было только по неполному набору признаков, подобранному для каждой выборки, причем такие наборы состоят из 2–3 графовых характеристик и нескольких морфометрических параметров-помощников. Данное замечание говорит об отсутствии гибкости моделей: высокое доверие моделей к графовым характеристикам может привести к ложной классификации объектов похожего рисунка сети, но незначительно отличающихся значений графовых признаков, и ошибки распознавания по этой группе параметров с малой вероятностью будут исправлены морфометрическими показателями, потому что обновленный набор необходимых и достаточных признаков содержит недостаточное для классификации число индивидуальных показателей формы.

Дополнительно была проверена модель для распознавания рек, каналов, автомобильных и железных дорог масштаба 1 : 100 000 на данных фрагмента Ленинградской области. Общая достоверность классификации составила 62 %. Безошибочно была распознана речная и дорожная сеть, однако все каналы и железные дороги вошли в класс автомобильных дорог. В этом заключается еще один аспект влияния общеклассовых графовых характеристик: если модель ошибается, то ошибается сразу на всех объектах одного класса, потому что они имеют постоянные значения графовых признаков и, как уже говорилось выше, морфометрические показатели не могут «спасти» классификационный процесс.

Вероятно, использование графовых характеристик при распознавании линейных пространственных объектов совместно с морфометрическими не всегда эффективно и требует отдельного поэтапного использования.

ВЫВОДЫ

Взаиморасположение пространственных объектов, в частности линейных, определяет рисунок местности, ее образ. С изменениями, связанными с процессом генерализации, он отображается в моделях пространства – картах и снимках. Анализируя сочетания

объектов геоизображений, человек получает информацию, пропорциональную его знаниям и опыту. Автоматизация этого процесса становится актуальной задачей, поскольку ее решение позволит повысить эффективность дешифрирования снимков, открыть новые возможности анализа, генерализации и использования карт, выявить неочевидные свойства пространственных объектов, автоматизировать процесс создания карт.

В работе представлены способы применения теории графов для решения задач, связанных с распознаванием классов линейных пространственных объектов. Параметры, характеризующие графовые структуры как цельные объекты, позволили в совокупности с методами машинного обучения распознавать группы объектов и отдельные объекты с удовлетворительной точностью (70–80 %).

Однако использование графовых характеристик при распознавании линейных пространственных объектов совместно с морфометрическими не всегда эффективно и требует отдельного поэтапного использования.

Дальнейшее направление исследования темы связано с разработкой методов распознавания типов рисунков объектов одного класса, например, гидрографических сетей: автоматизированное выделение перистого, центробежного, решётчатого и других типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лурье И.К., Косиков А.Г. Теория и практика обработки изображений. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / Под ред. А.М. Берлянта. М.: Научный мир, 2003.
2. Шурьгина А.А., Самсонов Т.Е. Исследование и систематизация морфометрических характеристик основных классов объектов общегеографических карт // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова / Ред. М.В. Зимин, П.Е. Каргашин, М.В. Кусильман и др. КДУ. М., 2017. С. 110–121.
3. Newman M.E.J. Mixing patterns in networks // Physical Review E. 2003. Т. 67, No 2. S. 026126.
4. Reingold O. Undirected connectivity in log-space // Journal of the ACM (JACM). 2008. Т. 55, No 4. P. 17.
5. Schank T., Wagner D. Approximating clustering-coefficient and transitivity. Universität Karlsruhe, Fakultät für Informatik, 2004.

REFERENCES

1. Lurie I.K., Kosikov A.G. Theory and practice of image processing. Remote sensing and geographic information systems / Edited by A.M. Berlant. M.: Nauchniy mir, 2003 (in Russian).
2. Newman M.E.J. Mixing patterns in networks. Physical Review E. 2003. Т. 67, No 2.
3. Reingold O. Undirected connectivity in log-space. Journal of the ACM (JACM). 2008. Т. 55, No 4. P. 17.
4. Schank T., Wagner D. Approximating clustering-coefficient and transitivity. Universität Karlsruhe, Fakultät für Informatik, 2004.
5. Shurygina A.A., Samsonov T.E. Analysis and systematization of morphometric characteristics of major classes of geographic maps' objects. Scientific research of young scientists-cartographers performed under the guidance of the staff of the Department of Cartography and Geoinformatics of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University / Ed. by M.V. Zimin, P.E. Kargashin, M.V. Kusilman et al. KDU, Moscow, 2017. P. 110–121 (in Russian).

Шестакова А.А.^{1,2}, Спектор В.Б.³, Торговкин Я.И.⁴

ОПЫТ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрено инженерно-геокриологическое районирование территории Республики Саха (Якутия), которое осуществлено с помощью анализа основных факторов формирования инженерно-геокриологических условий на территории РС (Я) и их картографического обобщения. Составлены карты-схемы районирования: рельефа (морфоструктурная), криогенных процессов, грунтовых условий, геокриологических условий и сейсмичности. Проведена балльная оценка разновидностей инженерно-геокриологических условий и выделены территории, в различной степени благоприятные для осуществления инженерной деятельности. Статья начинается кратким «Введением», в котором раскрываются цели и актуальность работы. Последующий раздел «Методика работ» освещает проведение ранжирования видов инженерно-геокриологических условий для удобства районирования. Далее рассматриваются «Факторы формирования инженерно-геокриологических условий территории Республики Саха (Якутия)», такие, как геодинамический, морфоструктурный, геокриологический, гидрогеологический и сейсмичность территории. В разделе «Результаты исследования и их обсуждение» рассматриваются составленные карты-схемы районирования по отдельным видам инженерно-геокриологических условий. Это карты-схемы морфоструктурного (геоморфологического) районирования, карты-схемы районирования по интенсивности криогенных процессов, по грунтовым условиям, по геокриологическим условиям и сейсмического районирования. Также приведен комплексный анализ перечисленных выше факторов инженерно-геокриологических условий. В разделе «Выводы» указывается, что исключительно сложным в инженерном отношении является регион Приморской низменности и мелководного шельфа. В дальнейшем для уточнения инженерных условий представляется рациональным составление мерзлотно-ландшафтной и геоморфологической карты территории РС (Я) и других карт, которые позволят оценить экономическую целесообразность различных видов инженерной деятельности на территории республики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: районирование, инженерно-геокриологические условия, криогенные процессы, грунтовые условия, морфоструктура.

¹ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Мерзлотная, д. 36, 677010, Якутск, Россия, *e-mail*: aashest@mail.ru

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, д. 58, 677027, Якутск, Россия, *e-mail*: aashest@mail.ru

³ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Мерзлотная, д. 36, 677010, Якутск, Россия, *e-mail*: vbspector@mpi.ysn.ru

⁴ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Мерзлотная, д. 36, 677010, Якутск, Россия, *e-mail*: torgovkin@mpi.ysn.ru

Alyona A. Shestakova^{1,2}, Vladimir B. Spektor³, Yaroslav I. Torgovkin⁴

EXPERIENCE OF ENGINEERING-GEOCRYOLOGICAL MAPPING OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

ABSTRACT

Engineering-geocryological zoning of the Republic of Sakha (Yakutia) is considered in the work, which was performed based on the analysis of the main factors controlling engineering-geocryological conditions in the region and their cartographic generalization. The schematic maps of zoning are made: relief (morphostructural), cryogenic processes, ground conditions, geocryological conditions and seismicity. A scoring of varieties of engineering-geocryological conditions was carried out and territories were identified in various degrees favorable for the implementation of engineering activities. The article begins with a short "Introduction", in which the goals and relevance of the work are revealed. The following section "Methods of work" highlights the ranking of the types of engineering-geocryological conditions for the convenience of zoning. Next, "Factors forming engineering geocryological conditions of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)" are considered, such as geodynamic, morphostructural, geocryological, hydrogeological and seismicity of the territory. In the section "Results of the study and their discussion", the compiled schematic maps of the zoning for individual types of engineering-geocryological conditions are considered. These are schematic maps of morphostructural (geomorphological) zoning, zoning schematic maps based on the intensity of cryogenic processes, ground conditions, geocryological conditions and seismic zoning. A complex analysis of the above-listed factors of engineering-geocryological conditions is also given. In the "Conclusions" section it is indicated that the region of the Primorsky lowland and shallow shelf is exceptionally difficult in engineering terms. In the future, to clarify the engineering conditions, it seems rational to compile a permafrost-landscape and geomorphological map of the territory of the RS (Y), and other maps that will enable us to assess the economic feasibility of various types of engineering activities on the territory of the Republic.

KEYWORDS: zoning, engineering-geocryological conditions, cryogenic processes, ground conditions, morphostructure.

ВВЕДЕНИЕ

Инженерно-геокриологическое районирование – один из методов инженерной геокриологии, объектом которого является геологическая среда криолитозоны, взаимодействующая с инженерными сооружениями.

Актуальность представленной работы объясняется ускорением освоения северных (в том числе Арктических) территорий, необходимостью информационного обеспечения планирования инженерной деятельности на территории РС (Я), принятия принципиальных решений по размещению объектов строительства и направлениям магистральных транспортных и инженерных коммуникаций, основ генеральных схем инженерной защиты от опасных геологических процессов, оценки эффективности строительства и эксплуатации крупных инженерных сооружений на территории РС (Я), предотвращения критических технических и экологических ситуаций.

¹ Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya str., 36, 677010, Yakutsk, Russia, *e-mail*: aashest@mail.ru

² North-Eastern Federal University in Yakutsk, Belinsky str., 58, 677027, Yakutsk, Russia, *e-mail*: aashest@mail.ru

³ Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya str., 36, 677010, Yakutsk, Russia, *e-mail*: vbspektor@mpi.ysn.ru

⁴ Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya str., 36, 677010, Yakutsk, Russia, *e-mail*: torgovkin@mpi.ysn.ru

Под инженерно-геокриологическим районированием понимается пространственная оценка территории с точки зрения изменчивости инженерно-геокриологических условий. Инженерно-геокриологические условия определяются свойствами мерзлых и оттаивающих пород, развитием мерзлотно-геологических процессов, состоянием горизонтов межмерзлотных и подмерзлотных вод, быстрой временной изменчивостью температурного поля пород [Основы..., 1999]. Анализ инженерно-геокриологических условий проведен на глубину 10–20 м, соответствующую зоне взаимодействия большинства инженерных сооружений, возводимых и планируемых на территории РС (Я), с криолитозоной.

МЕТОДИКА РАБОТ

Задачи инженерно-геокриологического районирования решены с помощью построения карт-схем, отражающих разные виды инженерно-геологических условий: 1 – строение рельефа; 2 – опасные геокриологические процессы (экзодинамической); 3 – грунтовые условия; 4 – геокриологические условия; 5 – гидрогеологические условия; 6 – сейсмические условия.

Для удобства районирования проведено ранжирование видов инженерно-геокриологических условий. Наивысший классификационный таксон – в ранге региона – был присвоен наиболее крупным элементам рельефа. Второй ранг – провинции – также закреплен за менее крупными элементами рельефа и тесно с ними связанными, криогенными процессами. Третий, более низкий по уровню таксономический уровень – ранг областей – был закреплен за грунтовой составляющей. Ранг районов был присвоен криогенной составляющей инженерно-геокриологических условий.

Вне ранжирования, на схемах-врезках, показаны гидрогеологическая составляющая инженерно-геокриологических условий и сейсмичность.

ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Проблему комплекса видов инженерно-геологических условий, определяющих сложность территории в инженерном отношении, нельзя считать окончательно решенной. Как пишет В.И. Попов, «для характеристики и оценки инженерно-геологических условий строительства должны быть освещены: а) строение земной коры и слагающие ее породы; б) строение поверхности земной коры; в) подземные воды; г) современные геологические процессы» [Попов, 1961, с. 8]. По мнению В.Т. Трофимова, «инженерно-геологические условия обычно рассматривают как комплекс современных геологических особенностей (параметров, факторов), определяющих условия инженерных изысканий, строительства и эксплуатации инженерных сооружений (узкий подход) или условия инженерно-хозяйственной деятельности человека в целом (широкий подход)» [Трофимов, 2002]. Компонентами инженерно-геологических (геокриологических) условий являются: 1) геологическое строение местности и характер слагающих ее пород; 2) рельеф; 3) гидрогеологические условия; 4) мерзлотные условия; 5) современные геологические процессы [Трофимов, Аверкина, 2007].

По определению В.Т. Трофимова, основной закон региональной инженерной геологии – закон И.В. Попова – приобретает вид: «Современные особенности инженерно-геологических структур Земли определяются историей их геологического развития, современными структурно-тектоническим положением и климатическими условиями, а на освоенных территориях и характером техногенных воздействий» [Трофимов, 1999, с. 34].

В приведенных высказываниях подчеркивается ведущая роль среди факторов, характеризующих инженерно-геологические условия, историко-геологического, тектонического фактора, определяющего, по мнению исследователей, облик основных элементов инженерно-геологического районирования – структурных зон. Эти структурные зоны, по мнению многих исследователей, контролируют набор определенных формаций, характеризуются особенностями магматизма, гидрогеологических условий и современных геологических процессов [Инженерная..., 1977]. Можно согласиться с тем, что историко-тектонический фактор в некоторой степени контролирует состав и размещение скальных и полускальных грунтов. Однако состав и распространение дисперсных грунтов, а также современные геологические процессы контролируются, главным образом, геодинамической обстановкой и зонально-климатическим, а в пределах территории РС (Я) геокриологическим фактором.

Геодинамический фактор обуславливает пространственное размещение основных *морфоструктурных элементов* – регионов равнин, плато, гор. Современная геодинамическая обстановка территории РС (Я) определяется находящимися в ее пределах современными границами двух литосферных плит: Евразийской и Северо-Американской – на восточной половине территории РС (Я) [Парфенов и др., 2001] и Байкало-Станового складчато-надвигового пояса – на юге территории РС (Я) [Тектоника..., 2001].

Морфоструктурный фактор определяет интенсивность и виды экзогенных процессов и грунтовые условия. Именно от этого фактора зависит сложность возведения и эксплуатации инженерных сооружений.

Геокриологический фактор оказывает непосредственное влияние на геологическую среду и в особенности на грунтовую составляющую инженерно-геологических условий [Основы..., 1999].

Гидрогеологический фактор – это в значительной степени геокриологические условия – приуроченность рассматриваемой территории к области распространения сплошной криолитозоны. Преобладающим типом вод здесь являются ультрапресные воды деятельного слоя.

Сейсмичность территории тесно связана с геодинамическим фактором и зонально-климатическим фактором, контролирующим перигляциальные области активных гляцио-изостатических движений.

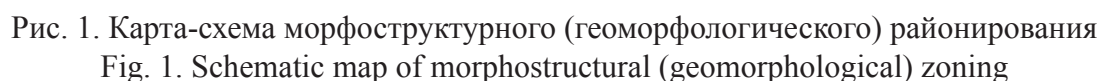
Обзор факторов, влияющих на формирование инженерно-геологических условий, показывает, что все эти факторы объединяются геодинамической обстановкой и климатической зональностью. Все факторы взаимосвязаны, и каждый в отдельности и все вместе влияют на рельеф, экзогенные процессы, на состав, свойства, температуру и размещение дисперсных грунтов и, в конечном итоге, на весь комплекс инженерно-геокриологических условий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже рассматриваются составленные карты-схемы районирования по отдельным видам инженерно-геокриологических условий.

Морфоструктурное (геоморфологическое) районирование территории Республики Саха (Якутия) (рис. 1).

Районирование территории РС (Я) проведено по морфоструктурному принципу. В соответствии с размерами рассматриваемой территории морфоструктуры (регионы) приняты авторами в качестве таксонов первого порядка: I – регион Приморской низменности и береговой зоны шельфа, II – регион равнин и плато Средней Сибири, III – Байкало-Становой регион, IV – Верхояно-Чукотский регион, V – Трансрегиональные области – долины крупных рек. Предлагаемая классификация близка к предлагаемой в работе [Основы..., 1999]. В зависимости от высотного положения вершинной поверхности, раз-



Формы рельефа и их генезис	Равнины	Плато	Горы
Аккумулятивные (аллювиальные, флювиогляциальные)	Низкие – 4	–	–
Денудационно-аккумулятивные	Средневысокие и приподнятые – 3	–	–
Денудационно-аккумулятивные	Высокие – 1	–	–
Денудационные	–	Низкие – 4	Низкие – 7, 8
	–	Средние – 5	Средние – 9, 10
	–	Высокие – 6	Высокие – 10–12

Районирование территории Республики Саха (Якутия) по интенсивности криогенных процессов (рис. 2).

В качестве примера характеристики криогенных процессов приведен лишь один из фрагментов таблицы (табл. 2), составленной нами для всей территории республики.

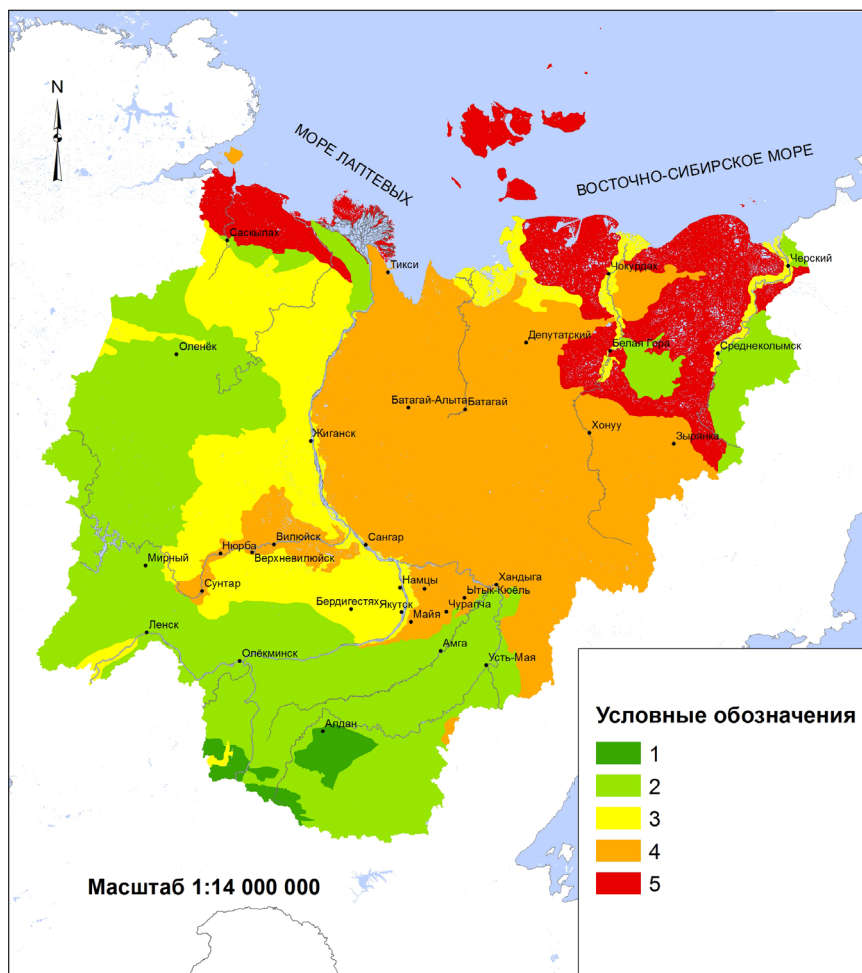


Рис. 2. Карта-схема районирования по интенсивности криогенных процессов

Fig. 2. Schematic map of zoning by the intensity of cryogenic processes

В колонке 2 этой таблицы приведена оценка степени опасности криогенных процессов для наземного строительства. В соответствии с классификацией, разработанной на кафедре геокриологии Геологического факультета МГУ [Основы..., 1999], по степени опасности криогенные процессы разделяются на следующие классы: незначительно опасные – 1 класс; малоопасные – 2 класс; умеренно-опасные – 3 класс; опасные – 4 класс; чрезвычайно-опасные – 5 класс. В третьей колонке таблицы приведены характеристики зонально-секторальных типов ландшафтов и их климатическая характеристика в соответствии с классификацией по работе. В четвертой колонке приведены виды криогенных процессов, интенсивность их проявления. Эти показатели оценены авторами карты на основании собственных предшествующих геокриологических и геоморфологических исследований на территории РС (Я). Классификация интенсивности проявления процессов по площади была проведена по методике, изложенной в работе [Основы..., 1999, таблица 5.3, с. 188]. Принятые сокращения видов процессов следующие: Т – термокарст; П – морозное пучение грунтов; Н – относительная наледность; С – солифлюкция; Сп – сплывы (оползни); Тэ – термоэрозия;

Та – термоабразия. На карте-схеме интенсивность экзогенных (криогенных) процессов показана цветом. На основе анализа интенсивности криогенных процессов проведена сравнительная оценка выделенных регионов по этому показателю (табл. 3).

Таблица 2. Фрагмент таблицы морфоструктурного районирования
и характеристики интенсивности и видов криогенных процессов
Table 2. Fragment of the table of morphostructural zoning and characteristics
of intensity and types of cryogenic processes

Таксоны морфоструктурного районирования	Интенсивность криогенных процессов в баллах	Зонально-секторальный тип ландшафта	Комплекс процессов с указанием интенсивности в баллах
Регион Приморской низменности и мелководного шельфа Провинции:		Арктический и субарктический	
I-1. Острова Анжу и Де-Лонга	5	ум-м	$Ta_{4-5} C_{п_{3-4}} T_{э_{3-4}} T_2 P_2$
I-2. Ляховские острова	5	ум-м	$Ta_{4-5} C_{п_{3-4}} T_{э_{3-4}} T_2 P_2$
I-3. Остров Бол. Бегичева	4	ум-м	$Ta_{3-4} T_{3-4} T_{э_{3-4}} P_{2-3} C_{п_{2-3}} C_2$
I-4. Полуостров Мамонтов Клык	5	ум-м	$Ta_{3-4} T_{3-4} T_{э_{3-4}} P_{2-3} C_{п_{2-3}} C_2$

Примечание. Содержание буквенных обозначений по [Основы..., 1999, табл. 5.2, с. 183–187]: ум – умеренно-морской, ук – умеренно-континентальный, к – континентальный, рк – резко-континентальный.

Таблица 3. Оценка сложности инженерно-геокриологических условий
по экзодинамическому показателю
Table 3. Estimation of the complexity of engineering-geocryological conditions
according to the exodynamic index

Регион	Преобладающий тип морфоструктур	Преобладающие экзогенные процессы	Оценка интенсивности экзогенных процессов в баллах
I. Приморской низменности и береговой зоны шельфа	Равнины низкие	$T_{4-5} T_{э_2} P_{2-3} C_1 C_{п_1}$	4–5
II. Равнин и плато Средней Сибири	Плато низкие и средневысокие	$T_{э_{2-3}} C_{2-3} C_{п_{2-3}} T_{1-2} P_{1-2}$	2–3
III. Байкало-Станового складчато-надвигового пояса	Средневысокие горы и плато	$C_2 C_{п_{1-2}} T_{э_{1-2}}$	1–2
IV. Верхояно-Чукотский	Горы низкие и средневысокие	$C_{п_{3-4}} C_{2-3} P_{1-2} T_{э_{1-2}} T_1$	3–4
V. Трансрегиональные регионы – долины крупных рек	Низкие равнины	$T_{э_{2-3}} T_{2-3} H_{2-3} P_{2-3} C_{1-2} C_{п_{1-2}}$	2–3

Районирования территории Республики Саха (Якутия) по грунтовым условиям (рис. 3). Для задач районирования грунтовых условий столь большой территории ранг грунтовых таксонов был ограничен классом и группой грунтов. Дополнительно были выделены переходные группы – сочетания карбонатных и терригенных грунтов, сочетания дисперсных и полускальных грунтов, двуслойные разрезы. Характеристика выделенных единиц по грунтовым условиям приведена в табл. 4.

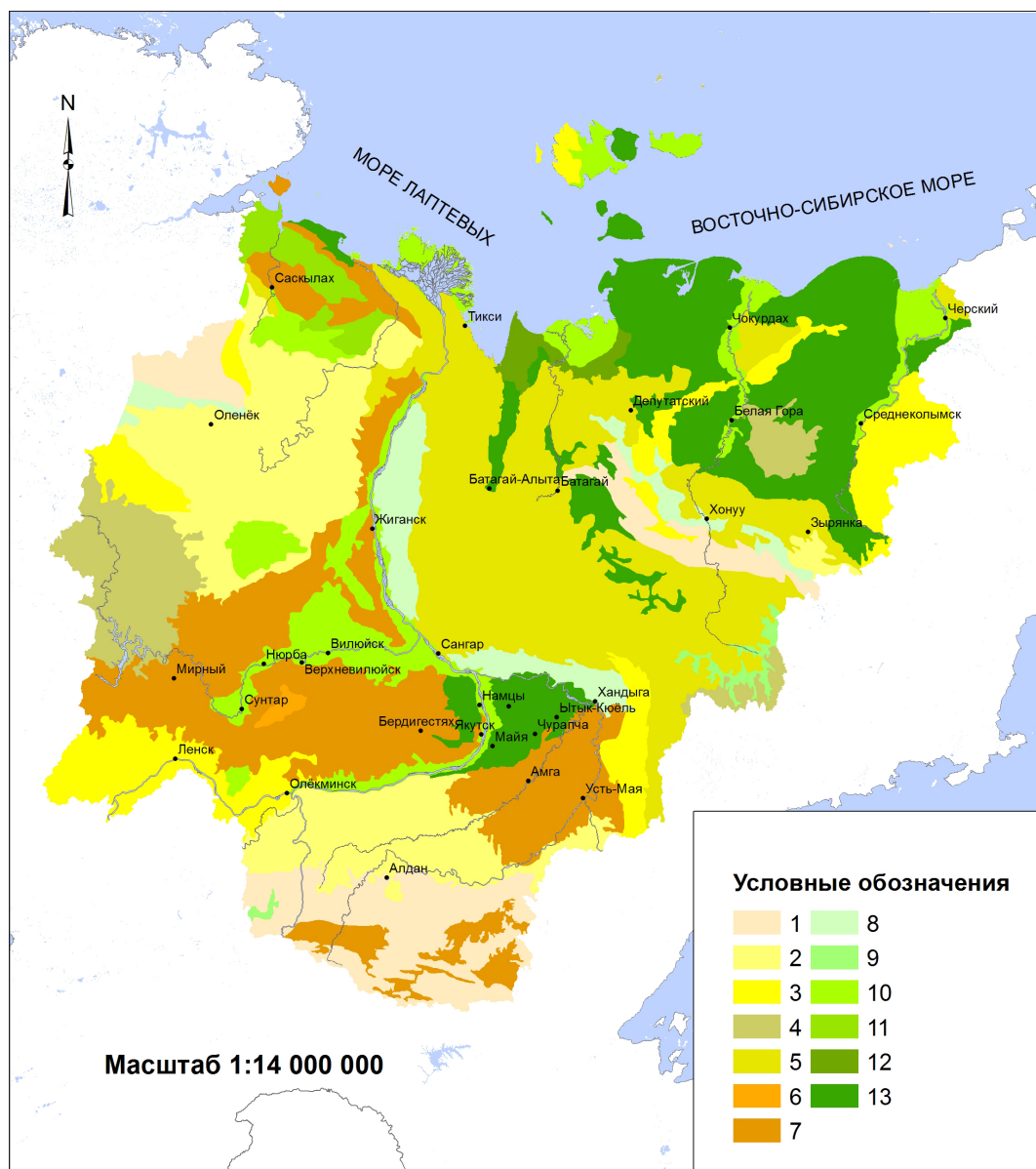


Рис. 3. Карта-схема районирования по грунтовым условиям:

1 – интрузивные, траппы, гнейсы, сланцы, роговики; 2 – известняки, доломиты; 3 – сочетание карбонатных и терригенных грунтов; 4 – туфы, лавы; 5 – переслаивание песчаников, алевролитов, аргиллитов, пласты и прослои углей; 6 – известняки, доломиты, гипс; 7 – сочетание песков, песчаных алевролитов, алевролитов, аргиллитов; 8 – щебни, галька, гравий, глыбы с песчано-суглинистым заполнителем; 9 – галечники, пески, супеси; 10 – пески, супеси с галькой, гравий, щебни; 11 – суглинки, супеси, глины, пески с гравием; 12 – илы минеральные и органические супеси, пески, торф; 13 – лессовидные суглинки, супеси, льдистые (>40 %)

Fig. 3. Schematic map of zoning by ground conditions

Таблица 4. Элементы грунтовой составляющей районирования
инженерно-геокриологических условий
Table 4. Elements of the soil component of the zonation
of engineering-geocryological conditions

Классы мерзлых и морозных грунтов	Группа	Группы видов и разновидностей
Скальные	Силикатные	Интрузивные всех групп, излившиеся траппы, метаморфические породы – 1
	Карбонатные, карстующиеся	Известняки, доломиты – 2
Полускальные	Сочетание скальных и полускальных	Сочетание карбонатных и терригенных грунтов: известняки, мергели, доломиты, прослой аргиллитов, алевролитов, песчаников, конгломератов – 2
	Вулканические	Туфы, лавы – 1
	Терригенные	Переслаивание песчаников, алевролитов, аргиллитов, пласты углей, прослой вулканитов, конгломератов – 1
Скальные и полускальные с прослоями растворимых		Терригенные и карбонатные с прослоями гипсов, доломитов, ангидритов, каменной соли – 6

Районирование Республики Саха (Якутия) по геокриологическим условиям.

Определяющим критерием состояния мерзлых грунтов для строительства наземных сооружений показан интервал температур $0 \div -2$ °С. Этот интервал температур контролирует пластические свойства мерзлых грунтов, определяя их твердомерзлое и пластично-мерзлое состояние (табл. 5). Кроме них на карте-схеме выделяются охлажденные и морозные грунты (рис. 4). Небольшие площади на юге территории, на участках островной и прерывистой мерзлоты, могут находиться и в талом состоянии. В скобках приведена оценка усложнения инженерно-геологических условий в зависимости от льдистости и температуры грунтов.

Таблица 5. Характеристика геокриологических условий
Table 5. Characteristics of geocryological conditions

Состав грунтов	Температура грунтов, °С	Состояние грунтов	Льдистость грунтов		
			Слабая	Средняя	Сильная
Дисперсные	Ниже -2°	Твердо-мерзлые	А (1)	Б (2)	В (4)
	$0 \div -2$ °С	Пластично-мерзлые	Г (2)	Д (3)	Е (5)
Скальные и полускальные	Ниже 0 °С	Охлажденные	Ж (4)		
		Мерзлые	З (0)	И (1)	К (2)
	Выше 0 °С	Талые	Л (1)		

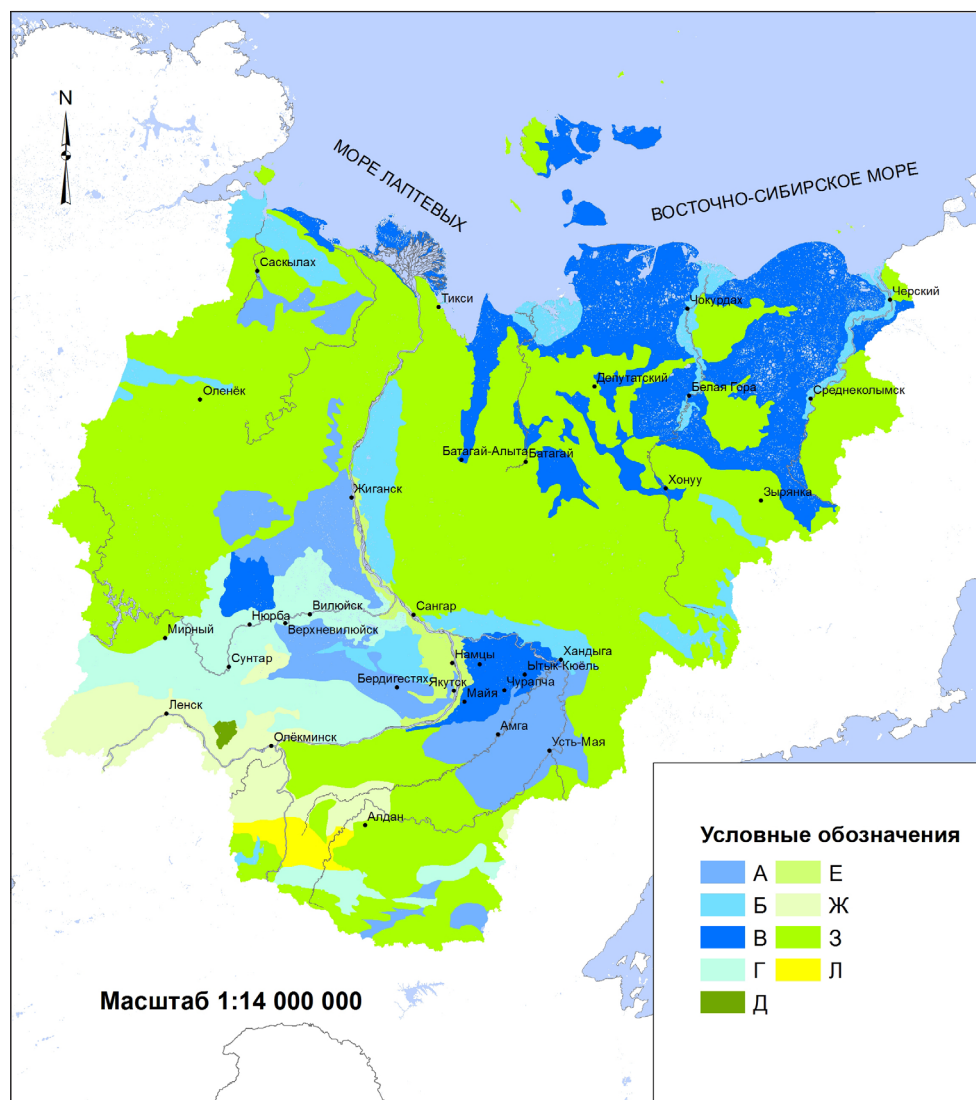


Рис. 4. Карта-схема районирования по геокриологическим условиям
Fig. 4. Schematic map of zoning by geocryological conditions

Районирование территории Республики Саха (Якутия) по гидрогеологическим условиям проведено по свойствам состава и агрессивности межмерзлотных и надмерзлотных вод.

На большей части территории надмерзлотные воды характеризуются гидрокарбонатно-кальциевым составом и не обладают агрессивными свойствами [Гидрогеологическая..., 1967; Гидрогеологическая карта СССР, 1969; Карта..., 1980, 1993]. На юго-западе территории в Байкало-Становом регионе отмечаются выходы минерализованных вод (в среднем 4 г/л) с сульфатной агрессивностью, приуроченные к участкам развития прерывистой и островной мерзлоты (табл. 6).

Карта-схема сейсмического районирования территории Республики Саха (Якутия) (рис. 5, автор Б.М. Козьмин, ИГАиБМ СО РАН). Проведено разделение территории по балльности землетрясений. Около 50 % территории РС (Я) относится к зонам, имеющим балльность около 6 баллов и выше. На остальной части территории возможны землетрясения интенсивностью 5 баллов (табл. 7).

Таблица 6. Характеристика гидрогеологических условий
Table 6. Characteristics of hydrogeological conditions

Тип криолито- зоны (КЛЗ)	Глубина залегания надмерзлотных и грунтовых вод	Тип агрессивности надмерзлотных и грунтовых вод	Оценка усложнения инженерно- геокриологических условий в баллах
Сплошная КЛЗ	До 3 м, в зонах разломов более 3 м	Неагрессивная	1
		Общекислотная + выщелачивающая	1
	До 3 м и до 10 м в межмерзлотных таликах	Неагрессивная	1
		Общекислотная + выщелачивающая	2
		Общекислотная + сульфатная	3
	3–10 м, спорадически более 10 м	Сульфатная (в переходной зоне)	3
		Выщелачивающая (тукуланы)	3
Прерывистая КЛЗ	3–10 м, спорадически более 10 м	Неагрессивная	1
		Сульфатная	3
Островная	Более 10 м	Сульфатная	3



Рис. 5. Карта-схема сейсмического районирования
Fig. 5. Schematic map of seismic zoning

Таблица 7. Преобладающая интенсивность землетрясений
в инженерно-геокриологических регионах территории Республики Саха (Якутия)
Table. 7. The prevailing intensity of earthquakes in engineering-geocryological
regions of the Republic of Sakha (Yakutia)

Регион	Интенсивность землетрясений в баллах	Оценочная балльность региона
I. Приморской низменности и береговой зоны шельфа	9–5	9
II. Равнин и плато Средней Сибири	5	5
III. Байкало-Станового складчато-надвигового пояса	9–6	9
IV. Верхояно-Чукотский	9–7	9
V. Трансрегиональные регионы – долины крупных рек	6–7	7

Комплексный анализ факторов инженерно-геокриологических условий

Составленные карты-схемы распространения факторов инженерно-геокриологических условий позволяют оценить относительную устойчивость выделенных элементов районирования разного таксономического ранга. Остановимся на сравнительной оценке для самых крупных единиц районирования – регионов (табл. 8). Подход к оценке условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений в условиях криолитозоны заимствован из известных работ [Основы..., 1999; Оспенников и др., 1980 и др.]. Исходные данные о сложности разных видов условий по выделенным регионам приведены в табл. 3–7 и на рис. 1–5.

Таблица 8. Сравнительная оценка сложности инженерно-геокриологических условий
Table 8. Comparative evaluation of the complexity of engineering-geocryological conditions

Регион	Сложность инженерно-геокриологических условий в баллах						
	Рельеф	Криогенные процессы	Грунтовые условия	Криологические условия	Гидрогеологические условия	Сейсмические условия	Сумма баллов
I. Приморской низменности и береговой зоны шельфа	4	5	10	4	1	9	33
II. Равнин и плато Средней Сибири	3	3	6	4	3	5	24
III. Байкало-Станового складчато- надвигового пояса	9	2	6	4	3	9	33
IV. Верхояно-Чукотский	12	4	2	1	1	9	29
V. Трансрегиональные регионы – долины крупных рек	4	3	7	1	1	7	23

Таким образом, наиболее благоприятными инженерно-геокриологическими условиями характеризуются долины крупных магистральных рек (23 балла) и близкие к ним по оценке равнины и плато Средней Сибири (Центральная Якутия). Наихудшие условия инженерной деятельности – в регионе Приморской низменности и шельфа, а также Байкало-Станового пояса, которые характеризуются сложностью около 33 баллов. Необходимо отметить, что данная оценка является сугубо ориентировочной, основанной на приблизительных оценках сложности и не учитывает экономического значения регионов.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований на основе современных технологий и программ (ArcGis10.1) были составлены детальные карты-схемы районирования территории РС (Я) по отдельным видам инженерно-геокриологических условий: рельефу, криогенным процессам, грунтовым условиям, пластическим свойствам грунтов, учитывающим температуру и льдистость, гидрогеологическим особенностям и сейсмичности территории. Каждая из этих карт-схем представляет собой самостоятельный предмет для анализа.

Исключительно сложным в инженерном отношении является регион Приморской низменности и мелководного шельфа. Эта сложность связана с грунтовыми и динамическими условиями. На территории суши рассматриваемого региона распространены преимущественно высокольдистые грунты ледового комплекса, имеющие оценку сложности 10 баллов. Высокая сейсмичность свойственна в основном акватории моря Лаптевых. Скорость криогенных процессов на этой территории представляется недостаточно оцененной. Наибольшую опасность здесь представляют термокарстовые процессы. Их средняя скорость (0,5–2 м/год) может быть оценена исходя из размеров наиболее крупных из них (5–20 км) и периода голоценового потепления (10 тыс. лет), наступившего после сартанского оледенения. В действительности современные скорости термокарста могут быть значительно выше в силу положительных обратных связей температур приземного слоя воздуха и процесса термокарста. В частности, скорость современных термоабразионных процессов достигает в отдельные годы первых десятков метров. Требуется дальнейшего уточнения и фактор эндогенной динамики рельефа. Некоторые наблюдения указывают на обусловленность эндогенных движений поверхности в зависимости от изменений климата. В частности, побережье моря Лаптевых, по данным повторных геодезических измерений, испытывает современные положительные движения [Бочаров и др., 1982], связанные с гляциоизостатическим поднятием. С учетом этих явлений оценка сложности инженерных условий на Приморской низменности может быть увеличена.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 17-05-41079.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, No 17-05-41079.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров Г.В., Гусев Г.С., Евсикова Л.В., Спектор В.Б. Карта современных вертикальных движений территорий Якутской АССР // Геотектоника. 1982. № 3. С. 60–64.
2. Гидрогеологическая карта СССР. Масштаб 1 : 2 500 000 / Ред. Д.И. Жив. М.: ГУГК, 1969. 16 л.

3. Гидрогеологическая карта Якутской АССР. Масштаб 1 : 2 500 000 / Ред. А.И. Ефимов, И.К. Зайцев. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, Изд-во Якутского гос. ун-та, 1967. 4 л.
4. Инженерная геология СССР. Т. 4. Дальний Восток. М.: МГУ, 1977. 502 с.
5. Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири. Масштаб 1 : 2 500 000 / Ред. П.И. Мельников. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1980. 4 л.
6. Карта надмерзлотных вод Республики Саха (Якутия). Масштаб 1 : 2 500 000 / Ред. П.И. Мельников. Якутск: Аэрогеодез. предпр., 1993. 6 л.
7. Основы геокриологии. Ч. 5: Инженерная геокриология / Ред. Э.Д. Ершов. М.: МГУ, 1999. 526 с.
8. *Оспенников Е.Н., Труш Н.И., Чижов А.Б., Чижова Н.И.* Экзогенные геологические процессы и явления (Южная Якутия). М.: МГУ, 1980. 227 с.
9. *Парфенов Л.М., Прокопьев А.В., Спектор В.Б.* Геодинамическая природа горных хребтов Восточной Якутии и их связь с раскрытием Евразийского бассейна // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 4. С. 708–725.
10. *Попов И.В.* Инженерная геология СССР. Ч. I. М.: МГУ, 1961. 178 с.
11. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: «МАИК» Наука / Интерпериодика, 2001. 571 с.
12. *Трофимов В.Т.* Основные законы инженерной геологии и ее научных направлений // Теоретические проблемы инженерной геологии: Тр. Междунар. науч. конф. М.: МГУ, 1999. С. 30–34.
13. *Трофимов В.Т.* Зональность инженерно-геологических условий континентов Земли. М.: МГУ, 2002. 348 с.
14. *Трофимов В.Т., Аверкина Т.И.* Теоретические основы региональной инженерной геологии. М.: ГЕОС, 2007. 464 с.
15. *Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А. и др.* Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. 6-е изд., перераб. и доп. М.: МГУ, 2005. 1024 с.

REFERENCES

1. *Bocharov G.V., Gusev G.S., Evsikova L.V., Spector V.B.* Map of modern vertical movements of the territories of the Yakut ASSR. *Geotectonica*. 1982. No 3. P. 60–64 (in Russian).
2. Engineering geology of the USSR. V. 4. Far East. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1977. 502 (in Russian).
3. Fundamentals of Geocryology. Part 5: Engineering Geocryology / Ed. E.D. Ershov. Moscow: Izd-vo Mosk. University, 1999. 526 p. (in Russian).
4. Hydrogeological map of the USSR. Scale 1 : 2 500 000 / Ed. D.I. Zhiv. Moscow: GUGK, 1969. 16 liters (in Russian).
5. Hydrogeological map of the Yakut ASSR. Scale 1 : 2 500 000 / Ed. A.I. Efimov, I.K. Zaitsev. Yakutsk: Izd-vo Permafrost Institute Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Yakut State University, 1967. 4 liters (in Russian).
6. Map of the over-frozen waters of the Republic of Sakha (Yakutia). Scale 1 : 2 500 000. Ed. P.I. Melnikov. Yakutsk: Aerogeodez. predpr., 1993. 6 liters (in Russian).
7. Map of the permafrost-hydrogeological zoning of Eastern Siberia. Scale 1 : 2 500 000 / Ed. P.I. Melnikov. Yakutsk: Izd-vo Permafrost Institute Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1980. 4 liters (in Russian).
8. *Ospennikov E.N., Trush N.I., Chizhov A.B., Chizhova N.I.* Exogenous geological processes and phenomena (South Yakutia). Moscow: Izd-vo Mosc. University, 1980. 227 p. (in Russian).

9. *Parfenov L.M., Prokopiev A.V., Spector V.B.* Geodynamic nature of the mountain ranges of Eastern Yakutia and their relationship with the disclosure of the Eurasian basin. *Geology and Geophysics*. 2001. V. 42, No 4. P. 708–725 (in Russian).
10. *Popov I.V.* Engineering geology of the USSR. Part I. Moscow.: Izd-vo Mosk. University, 1961. 178 p. (in Russian).
11. Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Moscow: MAIK Science / Interperiodica, 2001. 571 p. (in Russian).
12. *Trofimov V.T.* Basic laws of engineering geology and its scientific directions. Theoretical Problems of Engineering Geology. Tr. Int. scientific. Conf. Moscow: Izd-vo Mosk. University, 1999. P. 30–34 (in Russian).
13. *Trofimov V.T.* Zoning of engineering-geological conditions of the continents of the Earth. Moscow: Izd-vo Mosk. University, 2002. 348 p. (in Russian).
14. *Trofimov V.T., Averkina T.I.* Theoretical bases of regional engineering geology. Moscow: GEOS, 2007. 464 p. (in Russian).
15. *Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesensky E.A. et al.* Ground science / Ed. V.T. Trofimov. 6th ed., Pererabot. and additional. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 2005. 1024 p. (in Russian).

Калинкина Н.М.¹, Коросов А.В.¹, Белкина Н.А.¹,
Теканова Е.В.¹, Сярки М.Т.¹, Коросов А.А.²

ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «БИОРЕСУРСЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА»

АННОТАЦИЯ

Онежское озеро – один из крупнейших рыбохозяйственных водоемов высшей категории и стратегический источник чистой пресной воды в России. В настоящее время экосистема Онежского озера хорошо изучена. Достаточная обеспеченность данными позволила разработать ГИС-системы водных ресурсов Онежского озера, разработать термогидродинамические модели и прогнозировать допустимую биогенную нагрузку. В то же время практически не оцифрованными остаются биологические данные, хотя накоплен богатый материал по состоянию планктона и бентоса озера за период 1980–2017 гг. Целью настоящей работы стала разработка подходов к созданию ГИС, организующей физико-химические и биологические данные и объясняющей закономерности формирования биоресурсов Онежского озера. В результате была разработана геоинформационная система Онежского озера (ГИСО) для модельного описания зависимостей основных компонентов экосистемы (физико-химический состав воды и донных отложений, планктон и бентос). ГИСО создана на основе пакетов QGIS, MSAccess и языка программирования R. В ее основу положены карты Онежского озера, спутниковые снимки и данные полевых наблюдений, полученных за период 1980–2017 гг. ГИСО предназначена для хранения информации, для формирования выборок, количественной обработки и моделирования, выявления изменчивости пространственной структуры водных сообществ и визуализации результатов анализа. В статье предложены принципы создания ГИС, адаптированных для широкого круга специалистов, и вопросы оптимизации расположения точек отбора проб на основе ГИСО. На примере анализа состояния глубоководных бентосных сообществ с помощью ГИС-технологии было установлено значительное снижение их продукции в Онежском озере.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, Онежское озеро, биоресурсы.

Nataliia M. Kalinkina³, Andrei V. Korosov³, Natalya A. Belkina³, Elena V. Tekanova³,
Maria T. Syarki³, Anton A. Korosov²

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM "BIOLOGICAL RESOURCES OF ONEGO LAKE"

ABSTRACT

Onego Lake is one of the largest fishery water bodies of the highest category and strategic source of clear fresh water in Russia. At present time, the ecosystem of Lake Onego has been well studied. Sufficient data has allowed to develop a GIS-system of Lake Onego water resources, to

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 185003, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50, e-mail: cerioda@mail.ru

² Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway, e-mail: korosov@gmail.com

³ Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 185003, Petrozavodsk, Nevskogo str., 50, e-mail: cerioda@mail.ru

work out thermo-hydrodynamic models and to predict the permissible biogenic load. At the same time, biological data remains practically un-digitized, although there is a lot of material on the state of plankton and benthos of the lake for the period 1980–2017. The aim of this work was the working-out of approaches to the GIS, which organize physical-chemical and biological data to explain the regularities of Onego Lake biological resources formation. Onego Lake Geo-information System (GISO) was developed for modeling of interactions between the main ecosystem components including physical and chemical properties of water and bottom sediments, plankton and benthos. GISO used QGIS, MS Access and programming language R environments. It is based and incorporates Onego Lake vector maps, satellite images and field observation data collected during the period 1980–2017. GISO is designed for information storage, for spatial sampling of data for qualitative analysis and modeling, for identification of changes in the spatial structure of aquatic communities and for result visualization. The principles of developing GIS adapted for wide range of specialists and optimization of sampling points location are proposed. The significant decreasing of deep-water benthic communities production in Onego Lake was found were specified using of GIS technology.

KEYWORDS: GIS, Lake Onego, bioresources.

ВВЕДЕНИЕ

Географические информационные системы Онежского озера создавались неоднократно и выполняют различные функции. К настоящему времени довольно хорошо разработаны ГИС-системы водноресурсного потенциала Онежского озера [Онежское озеро. Атлас, 2010; Богданова, Литвиненко, 2015; Филатов и др., 2016; Филатов, 2017; Филатов, Меншуткин, 2017]. На основе моделирования экосистемы Онежского озера разработаны прогнозы наступления основных гидрологических событий в водоеме, а также рассчитаны допустимые величины биогенной нагрузки на водоем [Ladoga and Onego..., 2010; Меншуткин и др., 2015; Лозовик и др., 2016]. С помощью ГИС-технологий реконструируется палеоимнологическая история озера [Subetto et al., 2017, <http://www.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=47d76ba2004e463d96eba1d8a1825fe1>] и рельефа его дна [<http://docplayer.ru/36337534-Gis-modelirovanie-relefa-kotloviny-onezhskogo-ozera-i-ego-vodosbora-v-sovremennom-sostoyanii-i-retrospektive-zobkov-m-b-potahin-m-s-tarasov-a-yu.html>], создается представление о распределении химического качества вод в пространстве [Литвиненко и др., 2012; <http://www.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=157>], разрабатываются методы рационального использования ресурсов озера [Литвиненко и др., 2016].

Пока отсутствуют основания для сведения всех вариантов ГИС Онежского озера в единую конструкцию; разные институты, отделы, лаборатории создают свои ГИС, ориентированные на решение задач определенного класса.

В частности, отсутствуют разработки по биоресурсному потенциалу этого водоема. Известно, что Онежское озеро является малопродуктивным. Тем не менее природные характеристики озера (холодноводность, высокое качество воды, особая кормовая база рыб) обуславливают обитание в нем ценных видов рыб: сиг, ряпушка, корюшка, лосось озерный, форель, паляя [Биоресурсы Онежского озера, 2008]. Не до конца изученными являются механизмы формирования биоресурсов, т. е. передача вещества и энергии по трофической сети в связи с низкой продукцией фитопланктона [Теканова, Тимакова, 2006].

В последнее время в лаборатории гидробиологии Института водных проблем Севера ФИЦ «Карельский научный центр РАН» ставится задача – создать модельное описание основных компонент экосистемы Онежского озера, определяющих его продуктивность. Поскольку водное тело озера далеко не статично, появилась потребность рассматривать отдельные части акватории, в которых происходят те или иные химические и биогенные

процессы, с точки зрения временного пребывания вод и их последующего перемещения в пространстве. Функциональный (экологический) подход, типичный для гидробиологии, становится необходимым дополнить пространственным (географическим). Объединить эти подходы призвана создаваемая в лаборатории гидробиологии географическая информационная система «Биоресурсы Онежского озера» (ГИСО). Цель сообщения – описать структуру и функции ГИС, необходимой для объединения полученных данных, и дать первую иллюстрацию работоспособности системы на конкретном примере.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Географическая основа ГИСО – топографические карты Онежского озера и спутниковые снимки разных лет (в рассмотренном примере для уточнения границ использовали снимок LT05_L1TP_182017_19960611_20180225_01_T1.tif – Landsat 5 TIRS дата съемки: 11.06.1996). В информационной основе ГИС лежат данные, полученные в Институте водных проблем Севера ФИЦ «Карельский научный центр РАН» за 1980–2017 гг. и организованные в базу данных (БДО). К настоящему моменту в нее включены пробы зоопланктона (597 проб, 21 поле), фитопланктона (1141 проба, 23 поля), бактериопланктона (1548 проб, 14 полей), зообентоса (2163 пробы, 52 поля), химического состава вод (1026 записей, 60 полей). Все эти данные сведены в таблицы среды Excel и Access. Для всех точек отбора проб по GPS приемнику определялись их географические координаты, которые вручную вносили в базу и затем при геокодировании автоматически создавали точки на отдельном слое.

Построение векторных карт ГИСО (береговая линия, горизонтали и отдельные значения глубин, всего 3 слоя) выполнено вручную в среде QGIS [<https://www.qgis.org/ru/site/>]. Для использования ГИСО в работе также необходимы программные среды MS Access, Excel (связь с атрибутивными данными) и R. Среда Excel удобна для ввода атрибутивной информации, записанной в журналах, которые заполняются при выполнении наблюдений, камеральной и аналитической обработке проб. К сожалению, средства базы данных, реализованные в среде QGIS, весьма ограничены; они позволяют лишь связать таблицы (слои) по атрибутивным или географическим критериям. Однако для создания более сложных запросов (сводная статистика, сводная таблица) приходится использовать более развитую среду Access. Подготовленные посредством ГИС и Access таблицы с данными обрабатываются в среде пакета R. Типична ситуация, когда данные сначала подготавливаются для дальнейшей обработки и только после этого выполняется статистическая обработка – оценка значимости различий, зависимостей и пр. – с помощью соответствующего пакета среды R.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проблематика создания ГИС имеет множество аспектов, которые мы разнесли по разным рубрикам.

Принципы

В основе созданной ГИС положены следующие принципы.

ГИС должна быть построена на основе современных средств программирования и использовать доступные ресурсы Интернета. С этих позиций сделан выбор в пользу QGIS, которая интегрирована со многими картографическими ресурсами.

ГИС должна использоваться всеми научными сотрудниками (работающими по данной теме), а не только ответственным за базу данных и ГИСО. Практика показывает, что если применение информационной системы зависит от одного человека, любая случайность приводит к утрате ее функциональности. С этих позиций многие процедуры обработки данных, которые можно было написать на языке программирования R (используя картографические пакеты), реализуются в среде QGIS и Access, более доступных для применения, чем в R.

ГИС должна иметь универсальный характер и быть готовой к выполнению еще не запланированных поисковых задач. Иногда кажется привлекательным создать цельную программную конструкцию (в одной среде программирования), выполняющую определенные заданные функции. Однако такой подход приводит к сложности программного продукта, к обслуживанию ограниченным кругом лиц, а главное – к ограниченности вариантов использования. В этом смысле мы пошли по пути создания гораздо более «рыхлого» образования – организации не программного, но алгоритмического синтеза базы данных (в среде Access) и ГИС (в среде QGIS). Это позволит создать какие-либо новые интеграции, помимо описанных ниже, а также использовать эти конгломераты данных порознь.

Предназначение

Созданная ГИСО призвана выполнять следующие функции.

ГИС хранит информацию в виде векторных слоев, снабженных некой атрибутивной информацией, необходимой для связи между данными (ключи) и выражающей свойства обозначенных объектов.

ГИС порождает новую информацию. Во-первых, среда QGIS позволяет выполнять анализ спутниковых снимков и формировать массивы картографической (контуры) и атрибутивной (классы) информации. Во-вторых, средства пространственного анализа позволяют получать пространственные характеристики объектов (площади, дистанции...), отображенных на карте.

На основе ГИС выполняется формирование выборок для количественной обработки и моделирования. ГИСО поставляет географическую информацию (список идентификаторов) для извлечения из внешней базы данных (среды Access) группы географически близких объектов с последующим анализом их свойств. Фактически эту функцию и призвана описать наша публикация.

Помимо этого, ГИС может выполнять иллюстративную функцию, когда в качестве результата анализа ситуации строится картограмма того или иного типа.

Структура

Картографической основой ГИС служат векторные слои с контурами береговой линии Онежского озера, построенными по топографической карте (М 1 : 100 000). В перспективе планируется дополнить эти данные контурами озера в отдельные периоды прошлого. Карта рельефа дна содержит точечные данные о глубинах и слои с линиями глубинных горизонталей и полигонами глубин [http://www.etomesto.ru/map-genshtab_p36/].

Содержательной основой ГИСО являются слои с точками отбора гидробиологических и гидрохимических проб. На слой по отдельности нанесена локализация каждой **пробы**, даже если они брались в одном месте. Тем самым достигается географическая привязка каждого числа, помещенного в предметную базу данных (среды Access). В таблице атрибутов (среда QGIS) каждая точка снабжается своим номером (No), уникальным для каждого года (Ye); на этой основе формируется целочисленный составной ключ (YeNo), однозначно идентифицирующий точку в базах данных.

Важнейшей частью функционирования ГИСО являются слои районирования акватории, на основе которых выполняются выборки данных из атрибутивной БДО. Слои районирования составляются исследователем каждый раз в контексте поставленных задач и составлены из группы площадных объектов (областей, регионов). Области строятся таким образом, чтобы сформировались отдельные выборки из точек, подпадающих под эти области.

Пробы (точки), попавшие под заданные области акватории, формируют список (географический индексный файл), в котором каждая проба получает индекс (номер) той области, где они отбирались. Формат файла для обмена с БДО – книга Excel.

ГИСО будет наполняться и внешней информацией из мировой сети [<http://www.esa-sst-cci.org/>, <https://www.oceancolour.org/portal/>], и в результате анализа спутниковых снимков

[<https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html>]. Для моделирования сезонных процессов актуально составление карт ледовых полей, карт распределения температуры в поверхностном слое и др.

Связь между ГИСО и БДО

Поток информации от БДО – к ГИСО. Слои с точками проб в ГИСО создаются на основе данных из БДО. Внесенные в среду Access новые записи, содержащие уникальное обозначение типа данных: номер, дату отбора, расчетный составной ключ и координаты точек отбора, импортируются в среду QGIS и привязываются по координатам к карте.

Поток информации от ГИСО – к БДО. Выборки данных из БДО формируются на основе географического индексного файла, который представляет собой список индексов проб и номера выборки (области акватории), к которой данная проба отнесена. В среде Access эта таблица служит критерием для отбора проб и разнесения их по выборкам. В результате формируется запрос (виртуальная таблица), которая импортируется из среды Access и анализируется с помощью программы количественной обработки, например, R. Так дело обстоит, если отобраны пробы одного типа данных (например, по зообентосу). Однако для анализа интересны выборки, содержащие данные разного типа (например, состояние биоты и уровень загрязнения). В этом случае с использованием общего слоя областей готовятся два индексных файла – отдельно для каждого типа данных и в среде Access строятся два запроса, причем обычно в одной области акватории число проб разного типа различается. Здесь приходится решать задачу корректного объединения данных разных типов, попавших в границы общей области акватории; однако эта проблема к ГИС уже не имеет отношения.

Пример

Один из последних примеров использования ГИСО – публикация о зависимости зообентоса от химических особенностей среды [Калинкина, Белкина, в печати]. Цель работы состояла в отслеживании изменения продукции глубоководного зообентоса на протяжении двух последних десятилетий. В этом контексте использование ГИС состояло в том, чтобы указать на те области акватории, из которых выборки для разных лет наблюдений. Были построены три области с подобластями, всего 13 регионов (слой zon05) (рис. 1). Каждая подобласть получила свой индекс, включающий индекс области и номер подобласти: Петрозаводская губа (P2, P3, P5), Кондопожская губа (K3–K7), «Большое Онего» (B1, B2), «Центральное Онего» (C1–C4).

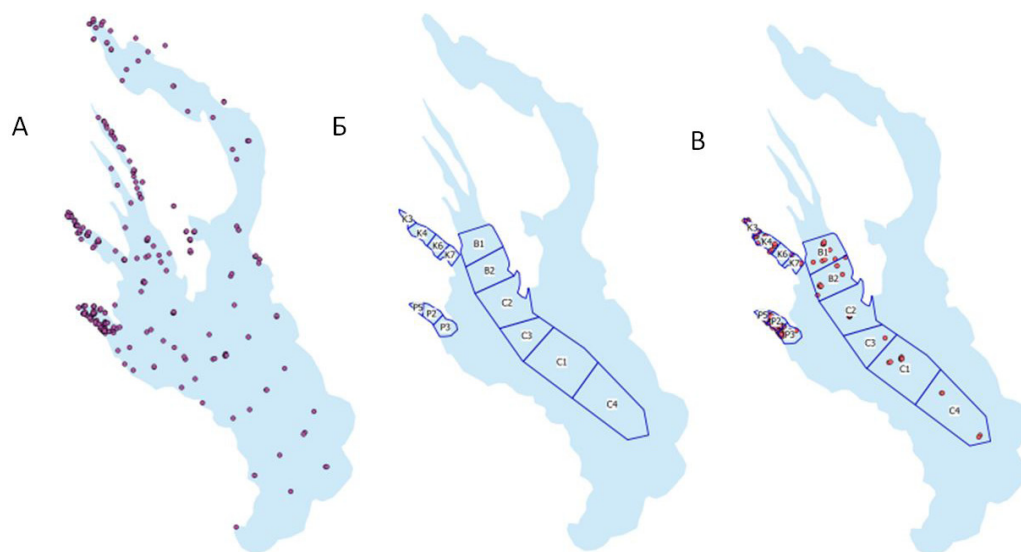


Рис. 1. Размещение точек отбора проб (А) и выделение областей (Б) для извлечения выборок (В)

Fig. 1. Place sampling points (A) and select areas (B) to extract samples (B)

Далее с помощью процедуры оверлея в таблицу слоя точек отбора проб по зообентосу (ZOOBENTHOS) было добавлено поле со значением индекса подобласти (zone), под которые они попали. После чего этот файл (ZPzon05) был экспортирован в формате csv и импортирован в среду Access.

В среде БДО, во-первых, была организована связь между индексным файлом и базой по зообентосу по полям YeNo. Во-вторых, был построен запрос, извлекающий только те записи из базы зообентоса, которые попали в соответствующие области акватории (рис. 2, А). В-третьих, в итоговый запрос включили значения биомассы зообентоса, разнесенные по полям Подобласть (sReg), Год (Ye), в качестве характеристик взяли средние, минимальные и максимальные значения (рис. 2, Б). Для более компактного представления данные были обобщены по пятилеткам.

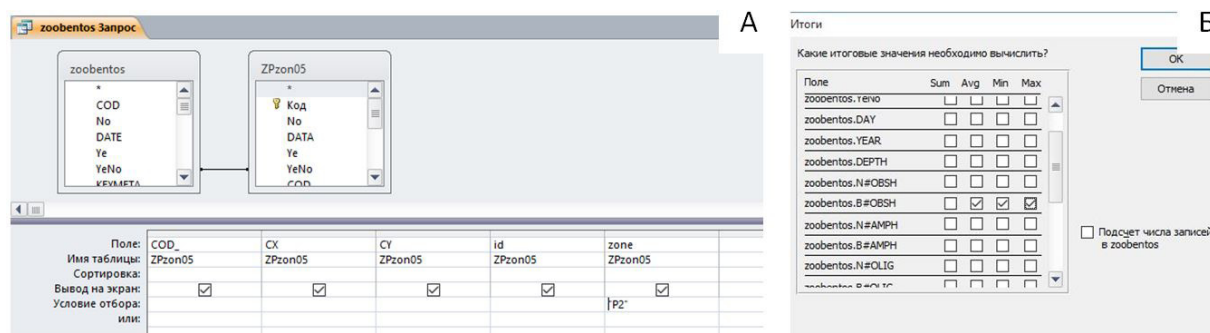


Рис. 2. Форматы запросов для извлечения (А) и обобщения (Б) данных по зообентосу

Fig. 2. Request formats for extracting (A) and generalizing (B) data of zoobenthos

Результаты обработки показали, что в последнее время продукция зообентоса существенно снизилась (рис. 3). Использование данной ГИС-технологии (построение индексного файла с помощью оверлея) позволило существенно ускорить обработку данных и уточнить границы зон, различающихся по структуре бентосных сообществ.

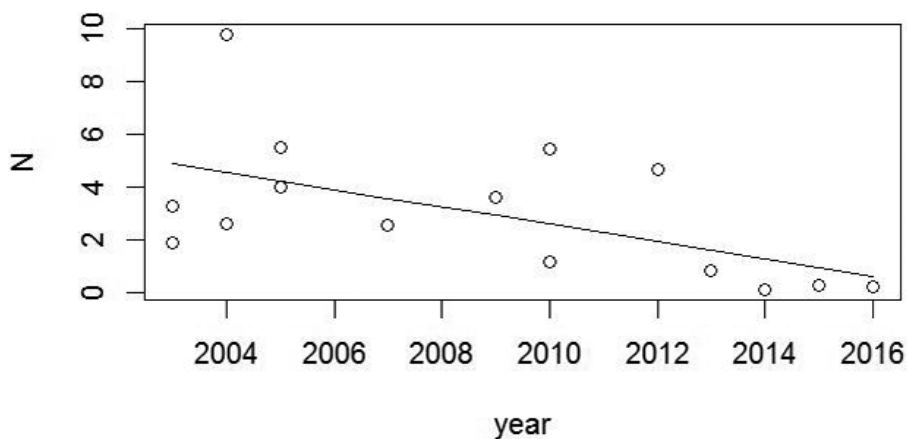


Рис. 3. Динамика численности зообентоса (тыс. экз./м²) в зоне P5

Fig. 3. Dynamics of the number of zoobenthos (thous ex./m²) in the P5 zone

Важно обсудить технические детали создания индексного файла. Традиционным для многих полевых биологических (в том числе гидробиологических) исследований является отбор проб в «стандартных» точках, которые получают «вечные» номера. Однако

практика показывает, что с течением времени часть таких точек теряет актуальность (далеко), часть фактически дублирует показатели соседних точек, часть резко меняет статус (застройка), часть пространственно смещается (невозможно взять две гидробиологические пробы из одного и того же места на открытой акватории), частично вводятся новые (расширение научных интересов).

От года к году число и расположение точек отбора проб не совпадает, значит, стандартная нумерация точек пробоотбора бессмысленна. Пока не было технологии ГИС, традиция была жива. В настоящее время смысл обретает только идентификация принадлежности пробы к той или иной области территории (в нашем случае – акватории). ГИС призвана заменить ненадежный «стандартный» номер, примерно позиционирующий пробу, на индекс области акватории, в которую проба попадает. При этом проба не привязана намертво к региону, но в зависимости от задач исследования может входить в объединение с разными пробами. Эта идеология позволила ввести в качестве идентификатора нужной информации индекс региона, вовсе отказавшись от номера точки отбора проб.

Другое традиционное заблуждение состоит в приверженности к сплошной нумерации проб. К сожалению, это построение рушится или усложняется (вводятся индексы у номеров), если обнаруживаются дополнительные пробы, собранные за прошедшие годы, например, другой группой исследователей. В рамках базы данных по Онежскому озеру мы от нее отказались, заменив этот ненадежный критерий составным ключом (YeNo), образованным из года (Ye) отбора пробы и номера (No) этой пробы в рамках сезонного отбора. Ключ YeNo надежно идентифицирует пробы и служит для связи точек отбора проб на слое в среде ГИСО с записями биологических данных в среде БДО.

Конструкция ГИСО + БДО получилась несколько громоздкой. Спрашивается, не проще ли организовать (в целом не очень большую) базу по озеру прямо в среде QGIS или даже в среде R (C++, Python, Java)? По нашему убеждению, чтобы обеспечить постоянное функционирование базы данных (БДО) и геоинформационной системы (ГИСО), их необходимо сделать доступными для использования многими исследователями. Для биологов освоение языков программирования высокого уровня в определенной мере противоречит их научным интересам. Программы же QGIS и Access имеют достаточно дружелюбные интерфейсы, чтобы ими пользовались все заинтересованные сотрудники.

ВЫВОДЫ

Построена географическая информационная система, которая обслуживает потребность получать выборки биологических данных по разным группам организмов, обитающих в Онежском озере. Ключевое предназначение ГИСО состоит в том, что в ней в оперативном режиме строятся области, служащие в качестве пространственных критериев для извлечения информации из предметной базы данных. Полученные выборки предназначены для статистической обработки данных и моделирования. Информационная система построена с использованием общедоступных программных средств, имеющих «дружелюбные» интерфейсы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out within the framework of the State task of Northern Water Problems Institute KarRC RAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биоресурсы Онежского озера / Ред. А.А. Лукин, В.И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 272 с.
2. Богданова М.С., Литвиненко А.В. ГИС «Водные объекты Республика Карелия и их использование» // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада Европейской территории России: современное состояние и изменение экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 20–21.
3. Калинин Н.М., Белкина Н.А. Динамика состояния бентосных сообществ и химического состава донных отложений Онежского озера в условиях действия антропогенных и природных факторов // Принципы экологии. 2018 (в печати).
4. Литвиненко А.В., Богданова М.С., Литвинова И.А. Хозяйственное использование водных ресурсов в прибрежной зоне Онежского озера: современное состояние и динамика // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 9. С. 27–32. DOI: 10.17076/lim317.
5. Литвиненко А.В., Богданова М.С., Карпечко В.А., Литвинова И.А. Оценка состояния водных ресурсов бассейна Онежского озера с использованием ГИС-технологий // Изв. Русского географического общества. 2012. Т. 144, № 2. С. 69а–80.
6. Лозовик П.А., Бородулина Г.С., Карпечко Ю.В. и др. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52.
7. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н., Баклагин В.Н. Моделирование экосистемы Онежского озера // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада Европейской территории России: современное состояние и изменение экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 175–185.
8. Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
9. Теканова Е.В., Тимакова Т.М. Первичная продукция и деструкция органического вещества в Онежском озере // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. С. 60–70.
10. Филатов Н.Н. Опыт информационного обеспечения регионов Севера РФ о состоянии и изменениях водных объектов и водосборов под влиянием климатических и антропогенных факторов // ИнтерКарто/ИнтерГИС. 2017. Т. 23, № 1. С. 130–142.
11. Филатов Н.Н., Менишуткин В.В. Проблемы оценки изменений экосистем крупных стратифицированных водоемов под влиянием климата и антропогенных факторов // Учен. зап. Российского государственного гидрометеорологического университета. 2017. № 48. С. 120–147.
12. Филатов Н.Н., Литвиненко А.В., Богданова М.С. Водные ресурсы северного экономического района России: состояние и использование // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 5. С. 502–514.
13. Ladoga and Onego – great European Lakes. Observations and Modeling / L. Rukhovets, N. Filatov (eds.). Chichester, UK: Springer, 2010. 302 p.
14. Subetto D., Zobkov M., Potakhin M., Tarasov A. From past to present – Late Pleistocene, last deglaciation and modern glaciers in the centre of northern Fennoscandia. Rovaniemi: Geological Survey of Finland, 2017. С. 158–159.

REFERENCES

1. Bioresources of Lake Onego / Ed. A.A. Lukin, V.I. Kukharev. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2008. 272 p. (in Russian).

2. *Bogdanova M.S., Litvinenko A.V.* GIS "Water bodies of the Republic of Karelia and their use" // The largest lakes-reservoirs of the north-west of the European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2015. P. 20–21 (in Russian).
3. *Filatov N.N.* An experience of information support for regions of the north of Russian Federation on the status and changes of water objects and drains under influence of climatic and anthropogenic factors. *InterCarto/InterGIS*. 2017. V. 23, No 1. P. 130–142 (in Russian).
4. *Filatov N.N., Litvinenko A.V., Bogdanova M.S.* Water resources on the northern economic region of Russia: the state and use. *Water Resources*. 2016. V. 43, No 5. P. 502–514 (in Russian).
5. *Filatov N.N., Menshutkin V.V.* Problems of estimation of influence climate and antropogenic factors on to gydrothermodynamics and ecosystems of large stratified inland waters. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2017. No 48. P. 120–147 (in Russian).
6. *Kalinkina N.M., Belkina N.A.* Dynamics of the state of benthic communities and the chemical composition of bottom sediments of the Onega Lake under conditions of anthropogenic and natural factors. *Principy ekologii*. 2018 (v pechati).
7. Ladoga and Onego – great European Lakes. Observations and Modeling / L. Rukhovets, N. Filatov (eds.). Chichester, UK: Springer, 2010. 302 p.
8. *Litvinenko A.V., Bogdanova M.S., Karpechko V.A., Litvinova I.A.* Assessment of the state of water resources in the Lake of Onega with the use of GIS technologies. *Izvestiya russkogo geograficheskogo obschestva*. 2012. T. 144, No 2. P. 69a–80 (in Russian).
9. *Litvinenko A.V., Bogdanova M.S., Litvinova I.A.* Economic use of water resources in the coastal zone of Lake Onega: current state and dynamics. *Transactions of the Karelian Research Centre of RAS*. 2016. No 9. P. 27–32. DOI: 10.17076/lim317.
10. *Lozovik P.A., Borodulina G.S., Karpechko Yu.V. et al.* Nutrient load on Lake Onego according to field data. *Transactions of the Karelian Research Centre of RAS*. 2016. No 5. P. 35–52 (in Russian).
11. *Menshutkin V.V., Rukhovets L.A., Filatov N.N., Baklagin V.N.* Modeling the ecosystem of Lake Onega. The largest lakes-reservoirs of the north-west of the European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2015. P. 175–185 (in Russian).
12. Onego Lake. Atlas / Ed. N.N. Filatov. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2010. 151 p. (in Russian).
13. *Subetto D., Zobkov M., Potakhin M., Tarasov A.* From past to present – Late Pleistocene, last deglaciation and modern glaciers in the centre of northern Fennoscandia. Rovaniemi: Geological Survey of Finland, 2017. C. 158–159.
14. *Tekanova E.V., Timakova T.M.* Primary production and destruction of organic matter in Lake Onego. The state and problems of production hydrobiology. M.: The Partnership of Scientific Publications KMK, 2006. P. 60–70 (in Russian).

Колесников А.А.¹, Кикин П.М.², Комиссарова Е.В.³, Касьянова Е.Л.⁴

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ЗАДАЧ

АННОТАЦИЯ

Машинное обучение и анализ данных являются наиболее популярными направлениями как в информационных технологиях, так и среди большинства направлений научных исследований. География, картография и геоинформатика с их разнообразием типов исходных и обрабатываемых данных, задач пространственного анализа, способов визуализации, способов моделирования и прогнозирования как нельзя лучше подходят для использования современных алгоритмов машинного обучения. Однако использование этих технологий редко выходит за рамки решения частных задач коммерческих компаний и зачастую не находит широкой огласки и тем более какой-либо систематизации и научного описания. В связи с этим было решено провести исследование технологий машинного обучения на предмет возможности их использования при решении наиболее типовых задач географических исследований. Приведена классификация задач, алгоритмов и методов компьютерного зрения с точки зрения геоинформационных систем. Описаны возможные способы решения некоторых задач классификации и сегментации растровых изображений. Проанализированы наиболее популярные из них, включая такие, как использование сверточных и предобученных нейронных сетей для распознавания объектов на спутниковых снимках. Апробация прошла в рамках соревнования по векторизации объектов гидрографии и классификации объектов в открытом море Statoil/C-CORE Iceberg Classifier Challenge. В качестве исходных данных были взяты размеченные спутниковые снимки водной поверхности. Рассмотрены способы анализа пространственных данных и визуализации результатов с помощью пространственной автокорреляции по индексу Морана и расчета коэффициента Джини. Также были исследованы способы решения задач прогнозирования с использованием наиболее популярных алгоритмов регрессии, апробированные на примере определения положения координат дома и работы по временному ряду транзакций банкоматов и касс в пунктах сервиса. Для проведения данного исследования использовался набор данных всероссийского соревнования по машинному обучению Raiffeisen Data Cup. Произведено сравнение результатов работы алгоритмов машинного обучения с традиционными методами пространственного анализа. По результатам проведенных исследований были сформулированы выводы о применимости исследованных алгоритмов и технологий для конкретных географических задач с учетом зависимости результатов от типов используемых данных, требований к ресурсам, точности, универсальности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: машинное обучение, картография, сегментация, нейронные сети, регрессия, геоинформатика, спутниковые снимки.

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плеханова, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия, *e-mail:* alexeykw@mail.ru

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плеханова, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия, *e-mail:* it-technologies@yandex.ru

³ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плеханова, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия, *e-mail:* komissarova_e@mail.ru

⁴ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плеханова, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия, *e-mail:* helenkass@mail.ru

Alexey A. Kolesnikov¹, Pavel M. Kikin², Elena V. Komissarova³, Elena L. Kasyanova⁴

USE OF MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES IN DECISION OF GEOINFORMATIONAL TASKS

ABSTRACT

Computer vision and data analysis are one of the most popular topics both among information technologies and most areas of scientific research. Geography, cartography and geoinformatics with their variety of types of source data, spatial analysis problems, visualization methods, modeling and forecasting methods cannot be better suited for using modern algorithms of machine learning. However, the use of these technologies rarely goes beyond the solution of private tasks of commercial campaigns and, often, is not widely publicized and any systematization or scientific description. In this respect, we decided to make a research of machine learning technologies in the context of using it while solving the most typical problems of geographical research. The classification of problems, algorithms and methods of computer vision from the point of view of geoinformation systems is given. Possible ways of solving some problems of classification and segmentation of raster images are described. The most popular of them are analyzed, including such as the use of convolutional and pre-conditioned neural networks for the recognition of objects on satellite images. The approbation took place within the competition in vectorization of hydrographic objects and the classification of objects in the open sea Statoil / C-CORE Iceberg Classifier Challenge. As initial data, we took marked satellite images of the water surface. The ways of spatial data analysis using the Moran index and calculating the Gini coefficient are considered. The methods of predicting the location of the coordinates of the house and work sudden user using the time series of ATM and cash register transactions at service points using regression algorithms were investigated. To conduct this study, the data set of the All-Russian competition in machine learning Raiffeisen Data Cup was used. We compared the results of usage of the machine learning algorithms and traditional methods of spatial analysis. Based on the results of the fulfilled investigations, we made the conclusions about the usability of the algorithms and technologies for specific geographic tasks, taking into account the dependence of the results from the types of using data used, resources requirements, accuracy, and universality.

KEYWORDS: machine learning, cartography, segmentation, neural networks, regression, geoinformatics, aerial images.

ВВЕДЕНИЕ

Машинное обучение и анализ данных являются одним из наиболее популярных и развивающихся направлений как в IT-индустрии, так и среди научных исследований.

В общем случае под машинным обучением понимается процесс улучшения производительности компьютерной программы при решении определенной задачи с учетом накопления опыта [Goodfellow et al., 2016; Mortensen et al., 2016].

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotnogo str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia, e-mail: alexeykw@mail.ru

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotnogo str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia, e-mail: it-technologies@yandex.ru

³ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotnogo str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia, e-mail: komissarova_e@mail.ru

⁴ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotnogo str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia, e-mail: helenkass@mail.ru

Наиболее популярными задачами машинного обучения, которые могут быть применены к исследованиям и использованию на практике в картографии и геоинформатике, являются [Benedetti, Rossini, 1993; Brown et al., 2002; Hariharan et al., 2014; Mortensen et al., 2016]:

- классификация – отнесение объекта к одной из категорий на основании его признаков; в качестве примеров можно привести разделение объектов на спутниковых снимках по типам, классификацию стран по демографическим показателям;
- регрессия – прогнозирование одного или нескольких количественных признаков объекта на основании набора прочих его признаков (как количественных, так и качественных), например, планирование показателей загрязнения территории, численности населения и т. п.;
- кластеризация – разбиение множества объектов на группы на основании признаков этих объектов так, чтобы внутри групп объекты были похожи между собой, а вне одной группы – менее похожи, причем количество групп заранее не известно; такой подход может применяться при поиске зависимостей между экономическими показателями, автоматизированном разбиении набора геологических скважин на группы по значениям показателей качества бурения;
- детекция аномалий – поиск объектов, сильно отличающихся от всех остальных в выборке либо от какой-то группы объектов, может применяться при поиске ошибок в таблицах семантических данных объектов, например, некорректных значений высоты горизонталей или отметок высот.

В зависимости от способа получения опыта (т. е. обработки новых блоков данных) алгоритмы машинного обучения разделяются на те, что обучаются «с учителем» (англ. supervised) и «без учителя» (англ. unsupervised learning)

В задачах обучения «без учителя» имеется выборка, состоящая из объектов, описываемых набором признаков. В задачах обучения «с учителем» вдобавок к этому для каждого объекта некоторой выборки, называемой обучающей, известен целевой признак, т. е. такой параметр, который хотелось бы прогнозировать для прочих объектов, не из обучающей выборки.

Рассмотрим несколько примеров решения геоинформационных задач методами машинного обучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера регрессии можно привести задачу, поставленную на конкурсе Raiffeisen Data Cup, проводимом Райффайзенбанком с 9 февраля по 23 марта 2018 г. на онлайн платформе Boosters.pro. Задача состояла в предсказании двух пар координат – для дома и работы по обезличенной истории транзакций при покупках и снятии наличных денег в банкомате. Среди предоставленной информации присутствовали координаты либо адрес банкомата, количество потраченных средств, валюта, дата транзакции и тому подобное. Метрикой качества является процент попаданий в окружность радиуса 0,02 градуса относительно координат дома и работы клиента (рис. 1).

Это соревнование представляет интерес с точки зрения следующих особенностей: традиционные алгоритмы регрессии предполагают прогнозирование одной числовой переменной, здесь же результатом будут являться две пары координат; поскольку в исходных данных присутствует информация о дате и времени события, то нужно учитывать не только пространственную, но и временную составляющую; поскольку отсутствовало примерно 30 процентов данных, то предобработка являлась очень важной составляющей успешного решения задачи. Для заполнения пропущенных значений использовались

как вычисления на основе существующих записей, так и данные из внешних источников, например, получение координат терминалов с помощью геокодирования адресов. Кроме традиционных статистических показателей для исследования исходных данных, содержащих объекты с пространственной привязкой, можно использовать специфические метрики – пространственный коэффициент Джини (англ. *Spatial Gini coefficient*) и индекс Морана (англ. *Moran's I Global Autocorrelation Statistic*) [Rey, Smith, 2013]. В общем виде обе метрики демонстрируют степень кластеризации пространственных объектов.



Рис. 1. Территориальное распределение точек, обозначающих транзакции
Fig. 1. Territorial distribution of transaction points

Авторами были выполнены наиболее простые варианты заполнения отсутствующих данных на основе существующих значений и с максимально возможным отсеиванием данных с пропусками. Выполнение расчетов пар координат осуществлялось на основе функции **Multi Output Regression** библиотеки **Scikit-Learn** для языка **Python**. В качестве алгоритмов расчета регрессии были использованы метод градиентного бустинга (реализация в программном обеспечении **xgBoost**) и **Random Forest** (библиотека **Scikit-Learn**) [Breiman, 2001; Bottou, 2010]. Использование метода градиентного бустинга для обоих предобработанных наборов исходных данных показало практически нулевую точность, «случайный лес» же показал значение 0,009125 для дополненных данных и 0,018875 для способа максимального отсеивания.

Далее рассмотрим задачу классификации. С точки зрения картографии и геоинформационных систем наиболее типовой задачей этой категории является распознавание объектов на изображениях, в качестве которых могут выступать спутниковые снимки, отсканированные тиражные оттиски на бумаге или пластике, абрисы геодезической съемки и т. п. В общем случае задачи технического зрения (к которым относится распознавание объектов) можно разделить на следующие категории:

- классификация – определение конкретного класса объекта на обрабатываемом изображении, т. е. на выходе формируется числовое или текстовое обозначение класса;

- классификация с локализацией – в результате обработки формируется обозначение класса и в виде векторной рамки, как правило прямоугольной (англ. bounding box), обозначается положение объекта на изображении;
- детектирование объектов – такой же принцип, что и в предыдущей категории, но детектируется и локализуется произвольное количество объектов на одном и том же изображении;
- семантическая сегментация (англ. semantic segmentation) – для каждого из пикселей обрабатываемого изображения формируется метрика, обозначающая его принадлежность к одному из заранее определенных классов [Hariharan et al., 2014; Hung, Ostermann, 2014; Mortensen et al., 2016];
- сегментация экземпляров (англ. instance segmentation) – логическое продолжение предыдущей категории, в этом случае из пикселей, относящихся к определенному классу, формируются отдельные растровые области, имеющие собственные контуры [Eigen,ergus, 2014; Hung, Ostermann, 2014].

Рассмотрим несколько методов машинного обучения на примере задач классификации (для определения типов видимых объектов в открытом море) и сегментации спутниковых снимков (применение алгоритмов сегментации при автоматизированной векторизации объектов гидрографии) в сравнении с традиционными ГИС-методами получения и анализа пространственной информации. Сначала рассмотрим задачу бинарной классификации объектов на спутниковых снимках.

В настоящее время многие учреждения и компании используют воздушную разведку для мониторинга условий окружающей среды и оценки рисков, связанных с айсбергами. Однако в отдаленных районах с особенно суровой погодой эти методы нецелесообразны, и единственным возможным вариантом мониторинга является использование данных со спутника. Компании Statoil и C-CORE запустили соревнование на платформе онлайн соревнований в области обработки данных [Kaggle.com](https://www.kaggle.com), чтобы открыть новые перспективы в отношении использования машинного обучения для более точного обнаружения и оценки представляемой угрозы от айсбергов как можно раньше. В этом соревновании предлагается построить алгоритм, который автоматически определяет, является ли дистанционно обнаруживаемая цель кораблем или айсбергом.

Для этого конкурса были предоставлены данные с двумя каналами: HH (передача и прием сигнала в горизонтальной поляризации) и HV (передача сигнала в горизонтальной поляризации, прием – в вертикальной). Это может сыграть важную роль в характеристиках объекта, поскольку объекты имеют тенденцию отражать излучение по-разному. Эти объекты можно визуально классифицировать, но основная проблема в очень большом количестве анализируемых изображений.

Данные (train.json, test.json) представлены в формате json (ознакомиться с его описанием можно на сайте json.org). Файлы состоят из наборов изображений, для каждого из которых указаны следующие поля:

- id – идентификатор изображения;
- band_1, band_2 – изображения в виде одномерного массива;
- inc_angle – угол падения, при котором был сделан снимок;
- is_iceberg – целевая переменная, существующая только в train.json, равная 1, если это айсберг, и 0, если это корабль.

Каждый канал имеет размер 75 на 75 пикселей, поэтому каждый элемент массива содержит 5625 элементов. Нужно отметить, что эти значения не являются традиционными для растровых изображений неотрицательными целыми числами, а представляют собой физические значения – это числа с плавающей точкой, показывающие уровень отраженного сигнала и измеряемые в децибелах. Полоса 1 (band_1) и полоса 2 (band_2) представ-

ляют собой сигналы, характеризующие обратное рассеяние сигнала спутника двух разных поляризаций с определенным углом падения. Поляризация соответствует HH (передача и прием в горизонтальной поляризации) и HV (передача сигнала в горизонтальной поляризации, прием – в вертикальной).

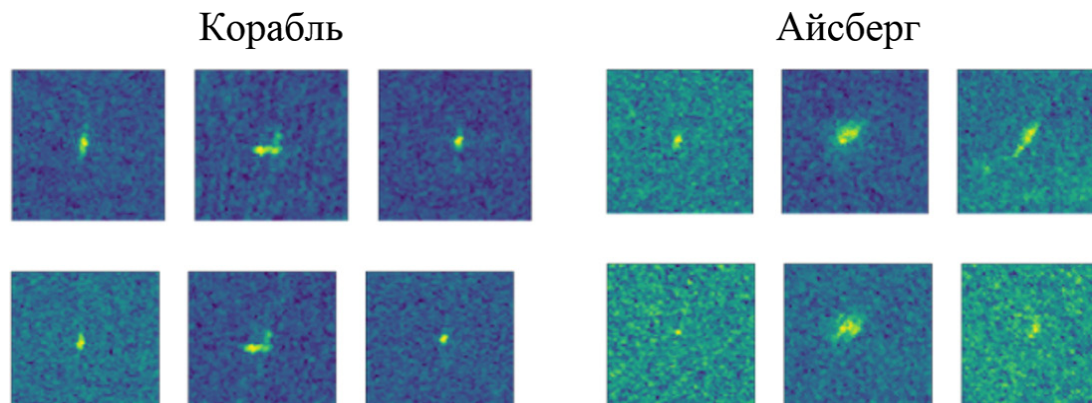


Рис. 2. Примеры изображений кораблей и айсбергов
Fig. 2. Examples of images of ships and icebergs

Суть исследования заключалась в сравнении ряда наиболее популярных методов машинного обучения большинства параметров, которые приняты по умолчанию на примере задач классификации растровых изображений. Поскольку практические результаты планируется использовать для классификации и сегментации объектов на видео для приложения дополненной реальности на мобильном устройстве, то в процессе исследования во внимание принималось не только точность, но и вычислительная емкость алгоритмов.

Одним из самых малозатратных, с точки зрения вычислительных ресурсов процессора, алгоритмов являются линейные модели, и для проведения эксперимента была выбрана логистическая регрессия. Тренировка заняла 218 секунд, предсказание 10,9 секунды, качество по метрике Logloss – 0,6984 и итоговое 1355 место.

Наиболее популярным способом повысить качество предсказания с минимумом изменений параметров обучающихся алгоритмов является ансамблирование. Суть этого подхода заключается в том, что по определенным правилам строится композиция алгоритмов, ошибки которых взаимно компенсируются. Правила оценки результатов каждого алгоритма строятся на основе схожести алгоритмов, размерах обучающей выборки, количестве признаков, их схожести и наличии или отсутствии выбросов в данных. Наиболее популярными правилами являются взвешенное среднее (упрощенный вариант смеси экспертов), бустинг («жадный» от англ. *greedy*), выбор алгоритма на текущем шаге, заключающийся в принятии локально оптимальных решений на каждом этапе, допуская, что конечное решение также окажется оптимальным, бэггинг (обучение на случайных подвыборках с повторениями из обучающей выборки), стекинг (использование набора предсказаний от алгоритмов на текущем шаге как вектора признаков для обобщающего метаалгоритма). Самым популярным алгоритмическим методом для задач машинного обучения разных типов является градиентный бустинг и его наиболее часто используемая реализация *xgBoost*. Суть градиентного бустинга состоит в построении ансамбля последовательно уточняющих друг друга элементарных моделей. Текущая элементарная модель обучается на ошибках ансамбля предыдущих моделей, ответы моделей взвешенно суммируются. Каждая последующая модель старается минимизировать значение функции потерь.

По результатам использования xgBoost тренировка заняла 186,5 секунды, предсказание – 14,2 секунды, качество по метрике Logloss – 0,2682 и итоговое 975 место.

В качестве логического продолжения предыдущего эксперимента были использованы две реализации градиентного бустинга в виде библиотек XGBoost и LightGBM. В качестве метода ансамблирования использовался бустинг, внутренней оценкой качества для обоих алгоритмов являлся logloss, и так же, как и в предыдущем варианте, использовалась кросс валидация с делением на три части. Для этого алгоритма тренировка заняла 2514,4 секунды, предсказание – 21,6 секунды, качество по метрике Logloss – 0,2021 и итоговое 536 место.

Далее приведем сводную таблицу результатов использования простых и предобученных сверточных нейронных сетей на базе Tensorflow.

Использование сверточных нейронных сетей
Comparison of the results of the use of convolutional neural networks

Тип сети	Время тренировки (секунды)	Время предсказания (секунды)	Logloss	Место
CNN	3800	39	0,2497	935
CNN+ VGG16	14 175	48	0,1745	304
CNN+ InceptionV3	15 867	53	0,1780	338

Опираясь на результаты замеров, приведенных в табл., можно сделать вывод, что если ориентироваться на использование нейронных сетей на стационарных компьютерах, то практически однозначно стоит отдать предпочтение использованию предобученных нейронных сетей для сокращения времени построения архитектуры.

Следующей задачей, которая будет рассмотрена в статье, является задача сегментации объектов гидрографии на спутниковых снимках Landsat с последующей векторизацией. Для оценки качества векторизации с помощью методов машинного обучения была выполнена векторизация объектов гидрографии вручную, принималась за эталон и затем сравнивалась с объектами, полученными с помощью методики NDVI [Peters et al., 2002] по космическому снимку и с помощью нейронной сети. Также для решения задачи автоматизированной классификации типов объектов гидрографии был использован метод дерева решений в качестве инструмента подбора наиболее оптимальных параметров классов [Benedetti, Rossini, 1993; Peters et al., 2002; Haug, Ostermann, 2014; Giusti et al., 2016].

В качестве исходных данных использовались снимки Landsat. В качестве тестового региона была взята территория Новосибирской области площадью 178 200 км². Из этой территории были выбраны участки, содержащие объекты гидрографии. Затем вручную средствами QGIS была выполнена разметка общего снимка. NDVI рассчитывался стандартным методом по инфракрасному и красному каналу Landsat 8 [Peters et al., 2002; Hariharan et al., 2014; Jia et al., 2014; Simonyan, Zisserman, 2014; Russakovsky et al., 2015].

Объекты гидрографии извлекались по значениям индекса от –0,25 до –0,5 и отобранным пикселям устанавливалась сплошная заливка. Настроенные таким образом пиксели затем инструментами QGIS собирались в полигоны (рис. 3).

Мера сходства, оцениваемая по коэффициенту Жаккара, составила примерно 65 процентов при настройках большинства инструментов QGIS по умолчанию.

Для работы с нейронными сетями использовалось программное обеспечение Keras с TensorFlow в качестве основной программной библиотеки и web-интерфейс Jupyter Notebook. Для начальных экспериментов нейронная сеть создавалась и обучалась без использования предобученных весов [Колесников и др., 2017; Haug, Ostermann, 2014].

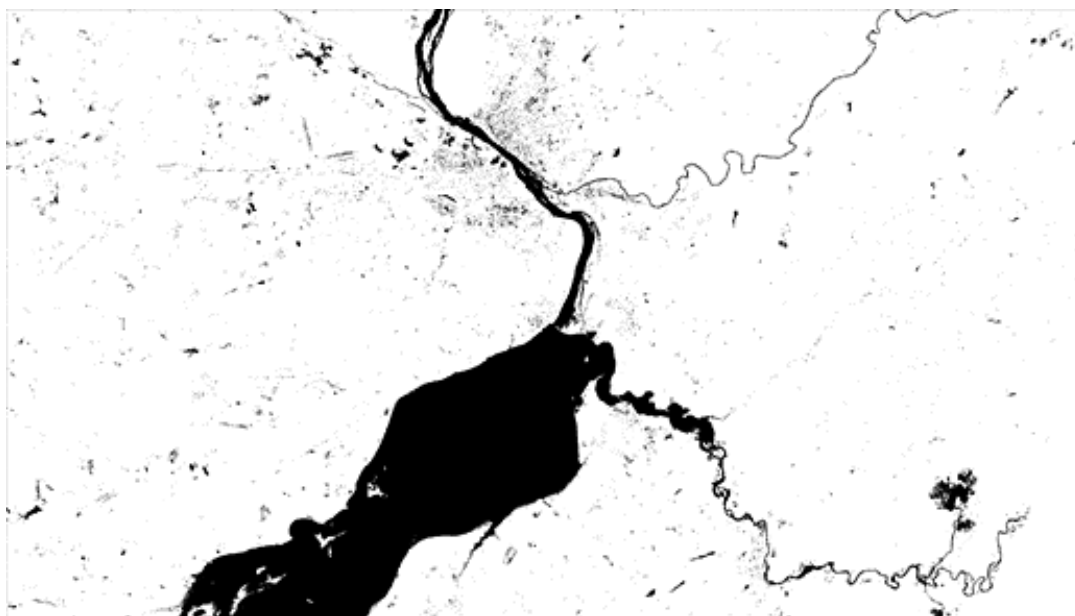


Рис. 3. Векторные полигоны, полученные по NDVI растру
Fig. 3. Vector polygons obtained by NDVI raster

Для создания тренировочного набора общий космический снимок был разделен на 1000 растров в градациях серого и 1000 черно-белых растров (масок для обучения), полученных путем растеризации объектов гидрографии, которые были ранее вручную векторизованы. Размеры тренировочных элементов составляли 580 на 420 пикселей.

Для первого эксперимента использовались снимки в естественных цветах, которые конвертировались в градации серого на основе яркостного канала. Все объекты гидрографии были представлены в виде одного класса сегментации (рис. 4).

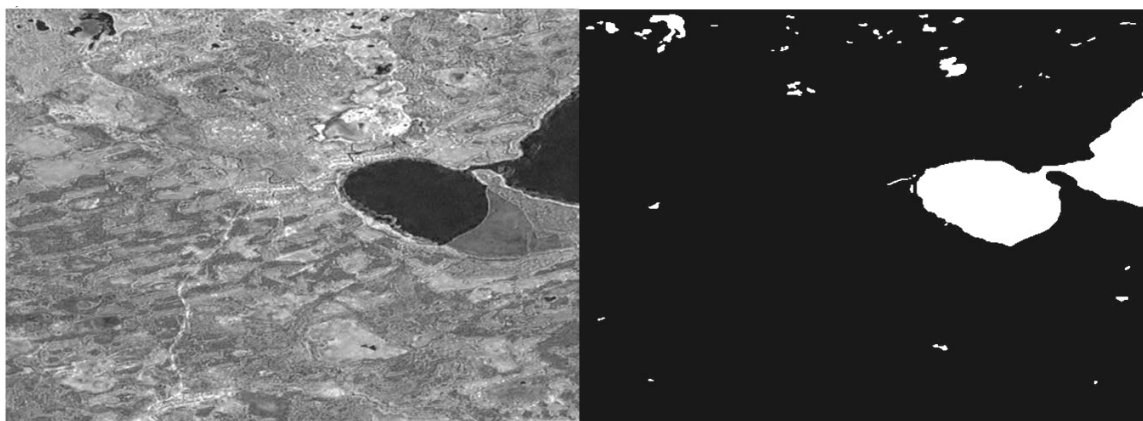


Рис. 4. Пример набора данных для обучения нейронной сети
Fig. 4. An example of a dataset for learning a neural network

Структурно сеть состоит из 9 сверточных слоев с функцией активации ReLU и полносвязного слоя для окончательного формирования картинки.

Для обучения сети и отображения меры сходства рассчитывается коэффициент Дайса. Все остальные настройки были использованы по умолчанию [Simonyan, Zisserman, 2014; Eigen, Fergus, 2015].

Результат после 20 эпох обучения и настроек сети по умолчанию – коэффициент потерь – 0,2421, коэффициент Дайса – 0,2421. Коэффициент Жаккара для этих параметров составил примерно 40 процентов за счет большого количества ложных срабатываний. Для того чтобы улучшить результат, были сделаны эксперименты с уменьшением в 2 раза размеров растров обучающей выборки (был получен эффект переобучения) и увеличением количества эпох до 30. В последнем варианте был получен наиболее качественный результат с коэффициентом Жаккара около 75 процентов. На рис. 5 приведены примеры работы сети и для сравнения результаты ручной разметки.

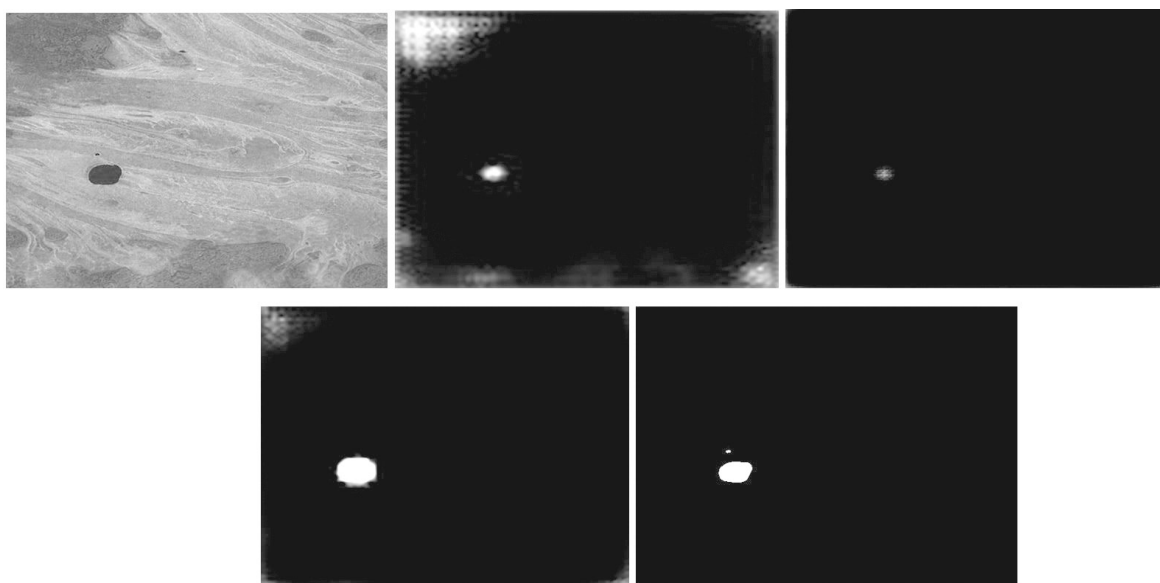


Рис. 5. Результаты сегментации для настроек по умолчанию, уменьшенных в два раза растров обучающей выборки, сети с 30 эпохами обучения и вручную размеченного фрагмента

Fig. 5. Segmentation results for the default settings, reduced by half the training sample size, the network with 30 learning epochs and manually marked fragment

После объединения элементов тестового растра инструментами QGIS выполнялась сборка полигонов и их разделение на реки и озера. Для разделения типов площадной гидрографии использовался алгоритм дерева решений в качестве исходных данных, для которого были использованы геометрические параметры объектов.

В QGIS в таблицу атрибутов были занесены числовые параметры для каждого объекта, такие как периметр, площадь, граничные координаты объектов, а также параметры, производные от базовых (рис. 6).

Для апробации метода была использована реализация деревьев решений из библиотеки Scikit-Learn. Максимальная глубина дерева менялась от 3 до 6 и точность по оценке `metrics.accuracy_score` от 0,976577 до 0,976889 соответственно для 30-процентной тестовой выборки. Такая высокая точность обусловлена несбалансированным количеством объектов разных типов. В варианте анализа гидрографических объектов на территории

Новосибирской области дерево решений с максимальной глубиной 3 было представлено следующим образом (рис. 7) [Колесников и др., 2017; Breiman, 2001].

Номер	Код	Тип	Соб_назв	Сост_об	X	Y	P	S	X_Y	type_num
519	S0031131000	ВОДОХРАНИЛИЩА	Кривое	ДЕЙСТВУЮЩИЙ	0.026481	0.010828	0.105960	0.000040	2.445604	0
520	S0031131000	ВОДОХРАНИЛИЩА	Быструшка	ДЕЙСТВУЮЩИЙ	0.012124	0.004921	0.027331	0.000006	2.463727	0
521	S0031131000	ВОДОХРАНИЛИЩА	NaN	ДЕЙСТВУЮЩИЙ	0.003671	0.004749	0.012712	0.000004	0.773005	0
522	S0031131000	ВОДОХРАНИЛИЩА	NaN	ДЕЙСТВУЮЩИЙ	0.004869	0.005701	0.017294	0.000004	0.854061	0
523	S0031131000	ВОДОХРАНИЛИЩА	NaN	ДЕЙСТВУЮЩИЙ	0.001460	0.000867	0.003619	0.000001	1.683968	0

Рис. 6. Параметры объектов гидрографии
Fig. 6. Attributes of hydrographic objects

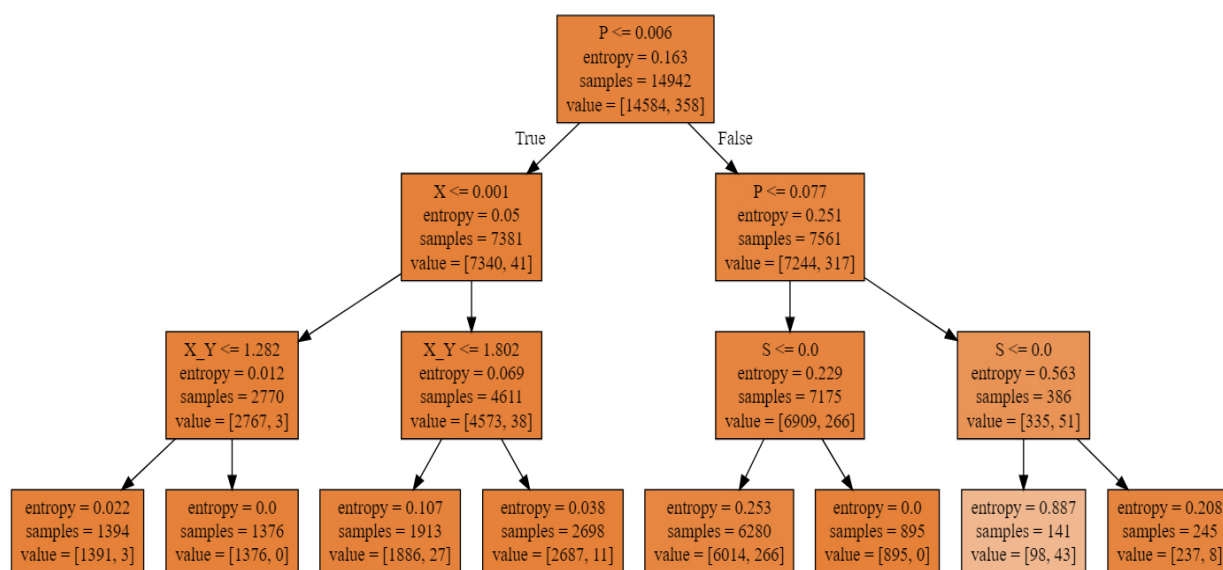


Рис. 7. Дерево решений для классификации объектов гидрографии
Fig. 7. The decision tree for the classification of hydrographic objects

С целью уменьшения переобучения на одном из типов объектов исходная обучающая выборка была откорректирована в сторону одинакового количества объектов разных типов. Наиболее оптимальным также оказалось дерево с максимальной глубиной 3 с точностью 0,862512.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования технологий машинного обучения можно сказать, что даже в варианте использования алгоритмов и программного обеспечения с большинством стандартных настроек можно получить результаты, сравнимые с результатами, получаемыми традиционными алгоритмическими методами.

Таким образом, для дальнейших исследований необходимо проанализировать результаты, получаемые с помощью дополнительной настройки (англ. fine-tuning) предобученных сетей, выполнить тренировку с перебором размера тренировочных растров, количеством и размерами полносвязных слоев, настройки типов пулинга после сверточных слоев [Колесников и др., 2017; Jia et al., 2014].

ВЫВОДЫ

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы: алгоритмические методы требуют меньших затрат по ресурсам для работы по сравнению с нейронными сетями, но чаще всего требуют больше операций по предобработке и конвертации данных, из алгоритмических методов наиболее универсальным является градиентный бустинг, нейронные сети при настройках по умолчанию (особенно при использовании предобученных сетей) показывают лучшие результаты, но требуют много времени на подбор архитектуры сети и модели детектора в зависимости от задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В. Программирование для ГИС в рамках подготовки студентов, обучающихся по специальности «Информационные системы и технологии» // Актуальные вопросы образования. Ведущая роль университета в технической и кадровой модернизации российской экономики: Сб. материалов Междунар. науч.-методич. конф. В 3-х ч. Ч. 1. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. С. 87–90.
2. Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В. Создание виртуальных моделей местности и зданий // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск. Междунар. науч. конф. «Раннее предупреждение и управление в кризисных ситуациях в эпоху больших данных»: Сб. материалов. Т. 2. Новосибирск: СГУГиТ, 2016. С. 37–40.
3. Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В. Использование открытых семантических баз данных для получения пространственной информации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск. Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: Сб. материалов. Т. 2. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. С. 53–57.
4. Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В., Грищенко Д.В. Использование машинного обучения для построения картографических изображений // Междунар. науч.-практ. конф. «От карты прошлого – к карте будущего», 28–30 ноября 2017 г., г. Пермь – г. Кудымкар. С. 110–120.
5. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. Convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 39 (12), No 7803544. 2017. P. 2481–2495.
6. Benedetti R., Rossini P. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics the case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna // Remote Sensing of Environment. 1993. V. 45. P. 311–326.
7. Bottou L. Large-scale machine learning with stochastic gradient descent // Proceedings of COMPSTAT' 2010. Springer, 2010. P. 177–186.
8. Breiman L. Random forests // Machine learning. 2001. T. 45, No 1. P. 5–32.
9. Brown F.J., Reed C.B., Hayes J.M. et al. A prototype drought monitoring system integrating climate and satellite data. Proceedings of the Pecora L5/land satellite information IV/ISPRS commission I/FIEOS. 2002. Colorado, USA.
10. Chen L.-C., Papandreou G., Kokkinos I. et al. Deeplab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected crfs. arXiv preprint arXiv:1606.00915, 2016.
11. Dai J., He K., Sun J. Boxsup: Exploiting bounding boxes to supervise convolutional networks for semantic segmentation // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2015. P. 1635–1643.

12. *Eigen D., Fergus R.* Predicting depth, surface normals and semantic labels with a common multi-scale convolutional architecture // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2015. P. 2650–2658; for Large-Scale Image Recognition, CoRR, vol. abs/1409.1556, 2014.
13. *Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J.* Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2014. P. 580–587.
14. *Giusti J. Guzzi, Cires D.C., He F.-L. et al.* A machine learning approach to visual perception of forest trails for mobile robots // IEEE Robotics and Automation Letters. 2016. T. 1, No 2. P. 661–667.
15. *Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.* Deep Learning. MIT Press. 2016. 800 c. ISBN: 9780262035613.
16. *Hariharan B., Arbelaez P., Girshick R., Malik J.* Simultaneous detection and segmentation // European Conference on Computer Vision. Springer, 2014. P. 297–312.
17. *Haug S., Ostermann J.* A Crop Weed Field Image Dataset for the Evaluation of Computer Vision Based Precision Agriculture Tasks // Computer Vision – ECCV 2014 Workshops. Zurich: Springer, 2014. P. 105–116.
18. *Hung C., Nieto J., Taylor Z. et al.* Orchard fruit segmentation using multi-spectral feature learning // Intelligent Robots and Systems (IROS) IEEE/RSJ International Conference on. IEEE. 2013. P. 5314–5320.
19. *Jia Y., Shelhamer E., Donahue J. et al.* Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding. arXiv preprint arXiv: 1408.5093, 2014.
20. *Mitchell T.* Machine learning. McGraw-Hill, 1997. 414 c. ISBN: 0070428077.
21. *Mortensen K., Dyrmann M., Karstoft H. et al.* Semantic segmentation of mixed crops using deep convolutional neural network. International Conference on Agricultural Engineering, 2016.
22. *Peters J.A., Walter-Shea A.E., Ji L. et al.* Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2002. V. 68: 7175.
23. *Rey S. J., Smith R. J.* A spatial decomposition of the Gini coefficient // Letters in Spatial and Resource Sciences. 2013. V. 6. P. 55–70.
24. *Russakovsky O., Deng J., Su H. et al.* ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge // International Journal of Computer Vision (IJCV). 2015. T. 115, N 3. P. 211–252.
25. *Simonyan K., Zisserman A.* Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. arXiv technical report, eprint arXiv:1409.1556, 2014.

REFERENCES

1. *Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R.* Convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 39 (12), No 7803544. 2017. P. 2481–2495.
2. *Benedetti R., Rossini P.* On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics the case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna. Remote Sensing of Environment. 1993. V. 45. P. 311–326.
3. *Bottou L.* Large-scale machine learning with stochastic gradient descent. Proceedings of COMPSTAT' 2010. Springer, 2010. P. 177–186.
4. *Breiman L.* Random forests. Machine learning. 2001. T. 45, No 1. P. 5–32.
5. *Brown F.J., Reed C.B., Hayes J.M. et al.* A prototype drought monitoring system integrating climate and satellite data. Proceedings of the Pecora L5/land satellite information 1V/ISPRS commission I/FIEOS. 2002. Colorado, USA.

6. *Chen L.-C., Papandreou G., Kokkinos I. et al.* Deeplab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected crfs. arXiv preprint arXiv:1606.00915, 2016.
7. *Dai J., He K., Sun J.* Boxsup: Exploiting bounding boxes to supervise convolutional networks for semantic segmentation. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2015. P. 1635–1643.
8. *Eigen D., Fergus R.* Predicting depth, surface normals and semantic labels with a common multi-scale convolutional architecture. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2015. P. 2650–2658; for Large-Scale Image Recognition, CoRR, vol. abs/1409.1556, 2014.
9. *Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J.* Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2014. P. 580–587.
10. *Giusti J. Guzzi, Cires D.C., He F.-L. et al.* A machine learning approach to visual perception of forest trails for mobile robots. IEEE Robotics and Automation Letters. 2016. V. 1, No 2. P. 661–667.
11. *Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.* Deep Learning. MIT Press. 2016. 800 p. ISBN: 9780262035613.
12. *Hariharan B., Arbelaez P., Girshick R., Malik J.* Simultaneous detection and segmentation. European Conference on Computer Vision. Springer, 2014. P. 297–312.
13. *Haug S., Ostermann J.* A Crop Weed Field Image Dataset for the Evaluation of Computer Vision Based Precision Agriculture Tasks. Computer Vision – ECCV 2014 Workshops. Zurich: Springer, 2014. P. 105–116.
14. *Hung C., Nieto J., Taylor Z. et al.* Orchard fruit segmentation using multi-spectral feature learning. Intelligent Robots and Systems (IROS) IEEE/RSJ International Conference on. IEEE. 2013. P. 5314–5320.
15. *Jia Y., Shelhamer E., Donahue J. et al.* Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding. arXiv preprint arXiv: 1408.5093, 2014.
16. *Kolesnikov A.A., Kikin P.M., Komissarova E.V.* Using open semantic databases to obtain spatial information. Interekspo GEO-Sibir'-2017. XIII Mezhdunar. nauch. kongr., 17–21 aprelya 2017 g., Novosibirsk. Mezhdunar. nauch. konf. "Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya": V. 2. Novosibirsk: SSUGT, 2017. P. 53–57 (in Russian).
17. *Kolesnikov A.A., Kikin P.M., Komissarova E.V.* Creating virtual models of terrain and buildings. Interekspo GEO-Sibir'-2016. XII Mezhdunar. nauch. kongr., 18–22 aprelya 2016 g., Novosibirsk. Mezhdunar. nauch. Konf. "Raneye preduprezhdeniye i upravleniye v krizisnykh situatsiyakh v epokhu bol'shikh dannyykh": sb. materialov. V. 2. Novosibirsk: SSUGT, 2016. P. 37–40 (in Russian).
18. *Kolesnikov A.A., Kikin P.M., Komissarova E.V., Grishenko D.V.* Using machine learning for mapping. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Ot karty proshlogo – k karte budushchego", 28–30 noyabrya 2017, g. Perm' – g. Kudymkar. P. 110–120 (in Russian).
19. *Kolesnikov A.A., Kikin P.M., Komissarova E.V.* Programming for GIS in the framework of the preparation of students studying in the specialty "Information Systems and Technologies". Aktual'nyye voprosy obrazovaniya. Vedushchaya rol' univ-ta v tekhn. i kadrovoy modernizatsii rossiyskoy ekonomiki: sb. mater. Mezhdunar. nauchno-metodich. konf. Part 1. Novosibirsk: SSUGT, 2015. P. 87–90 (in Russian).
20. *Mitchell T.* Machine learning. McGraw-Hill, 1997. 414 p. ISBN: 0070428077.
21. *Mortensen K., Dyrmann M., Karstoft H. et al.* Semantic segmentation of mixed crops using deep convolutional neural network. International Conference on Agricultural Engineering, 2016.

22. *Peters J.A., Walter-Shea A.E., Ji L. et al.* Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2002. V. 68: 7175.
23. *Rey S. J., Smith R. J.* A spatial decomposition of the Gini coefficient. *Letters in Spatial and Resource Sciences*. 2013. V. 6. P. 55–70.
24. *Russakovsky O., Deng J., Su H. et al.* ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *International Journal of Computer Vision (IJCV)*. 2015. V. 115, No 3. P. 211–252.
25. *Simonyan K., Zisserman A.* Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. arXiv technical report, eprint arXiv:1409.1556, 2014.

Баранова М.С.¹, Филиппов О.В.², Кочеткова А.И.³, Брызгалина Е.С.⁴

АТТРИБУТИВНАЯ БАЗА ДАННЫХ ЗАЛИВОВ ВОЛГОГРАДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

АННОТАЦИЯ

Одним из самых актуальных для Волгоградского водохранилища становится процесс разрушения берегов, а также производные процессы вдольберегового транспорта и седиментации продуктов разрушения. Активно продолжается процесс образования абразионно-аккумулятивных пересыпей во входных створах его заливов. Поэтому возникает необходимость сбора и систематизации данных о заливах водохранилища. Подобные данные наиболее эффективно хранить в атрибутивной базе данных в геоинформационной системе. В ходе настоящего исследования по снимкам Google Планета Земля был создан полигональный векторный слой заливов водохранилища. После его создания была заполнена атрибутивная таблица. В нее вошли следующие поля: название залива, берег, расстояние от плотины Волжской ГЭС, участок водохранилища, дата снимка Google Планета Земля, по которому проводилось измерение линейных и вычисление площадных величин, ширина залива во входном створе, ширина абразионно-аккумулятивной отмели залива, длина абразионно-аккумулятивной пересыпи, длина (протяженность) залива, наличие связи с водохранилищем, впадающие в залив водотоки, площадь залива; а также для заливов, в устьевых створах которых полностью сформировались абразионно-аккумулятивные пересыпи, – ширина перемычки, год, к которому пересыпь во входном створе сформировалась. Сроки отделения заливов были определены по мозаикам спутниковых снимков Landsat 5, Landsat 7 и Landsat 8 за 1986–2016 гг., остальные линейные и площадные параметры измерялись либо рассчитывались по снимкам Google Планета Земля 2010–2017 гг. Полигональный векторный слой заливов был переведен в точечный. Проведен анализ статистических характеристик заливов, включая среднеквадратическое отклонение, дисперсию и коэффициент вариации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Волгоградское водохранилище, заливы, атрибутивная база данных, абразионно-аккумулятивные пересыпи, спутниковые снимки.

¹ Волжский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный университет», ул. 40 лет Победы, д. 11, 404133, Волжский, Волгоградская область, Россия, *e-mail:* maria_baranova2902@rambler.ru, unlesi@mail.ru

² Волжский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный университет», ул. 40 лет Победы, д. 11, 404133, Волжский, Волгоградская область, Россия, *e-mail:* ovfilippov@list.ru, unlesi@mail.ru

³ Волжский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный университет», ул. 40 лет Победы, д. 11, 404133, Волжский, Волгоградская область, Россия, *e-mail:* aikochetkova@mail.ru, unlesi@mail.ru

⁴ Волжский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный университет», ул. 40 лет Победы, д. 11, 404133, Волжский, Волгоградская область, Россия, *e-mail:* bryzgalina_elena@mail.ru, unlesi@mail.ru

Maria S. Baranova¹, Oleg V. Filippov², Anna I. Kochetkova³, Elena S. Bryzgalina⁴

ATTRIBUTIVE DATABASE OF BAYS OF THE VOLGOGRAD RESERVOIR

ABSTRACT

One of the most active for the Volgograd reservoir is becoming the process of destroying of coasts and derivatives processes of along the coast transport and the sedimentation of a products of destruction. The process of formation of abrasion-accumulation jumpers in the entrance gates of its bays is actively continuing. Therefore, it is necessary to compile and systematize data about a reservoir bays. This data is most effectively keeps in the attributive database in the geoinformation system. In the course of this research, a polygonal vector layer of the reservoir bays was created using imagery of Google Earth. After its creation the attributive table was filled. It contents the following fields: the name of the bay, the coast, the distance from the dam of the Volzhskaya HPP, the region of the reservoir, the date of the image Google Earth, on which the linear measurements were carried out and the calculation of the area values, the width of the bay in the entrance gates, the width of the abrasion-accumulative shallow of the bay, the length abrasion-accumulative jumper, the length (extent) of the bay, the presence of a connection with the reservoir, watercourses, flowing into the bay, the area of the bay; as well as for the bays in the entrance gates where the abrasion-accumulation jumpers were completely formed, – the width of the jumper, the year to which the jumper in the entrance gates was formed. Terms of the separation of the bays were determined by the mosaics of satellite images Landsat 5, Landsat 7 and Landsat 8 from 1986–2016, the remaining linear and area parameters were measured, or calculated from the images of Google Earth 2010–2017. The polygonal vector layer of the bays was translated into a point one. The analysis of statistical characteristics of the bays, including the standard deviation, dispersion and the coefficient of variation, is carried out.

KEYWORDS: Volgograd reservoir, bays, attributive database, abrasion-accumulative jumpers, satellite data.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс разрушения берегов крупных равнинных водохранилищ вместе с производными процессами вдольберегового транспорта и седиментации продуктов разрушения становится на сегодняшний день одним из наиболее актуальных. Повышенное внимание к проблеме переноса материала, образующегося, главным образом, в результате переработки береговых склонов, объясняется различиями в геоморфологическом эффекте, создаваемом деятельностью разнонаправленных процессов (поперечного и продольного перемещения наносов). Поперечное перемещение наносов (от берега) ведет к рассеиванию их

¹ Volzhsky branch of federal state autonomous educational institution of higher education "Volgograd State University", 40 Let Pobedy str., 11, 404133, Volzhsky city, Volgograd region, Russia, *e-mail*: **maria_baranova2902@rambler.ru, unlesi@mail.ru**

² Volzhsky branch of federal state autonomous educational institution of higher education "Volgograd State University", 40 Let Pobedy str., 11, 404133, Volzhsky city, Volgograd region, Russia, *e-mail*: **ovfilippov@list.ru, unlesi@mail.ru**

³ Volzhsky branch of federal state autonomous educational institution of higher education "Volgograd State University", 40 Let Pobedy str., 11, 404133, Volzhsky city, Volgograd region, Russia, *e-mail*: **aikochetkova@mail.ru, unlesi@mail.ru**

⁴ Volzhsky branch of federal state autonomous educational institution of higher education "Volgograd State University", 40 Let Pobedy str., 11, 404133, Volzhsky city, Volgograd region, Russia, *e-mail*: **bryzgalina_elena@mail.ru, unlesi@mail.ru**

большей части на поверхности подводного склона, исключая из процесса самовосстановления контур береговой линии. Продольное перемещение (вдольбереговое), напротив, ведет к формированию относительно устойчивых аккумулятивных тел в непосредственной близости от берега, а иногда даже к его наращиванию [Назаров, 2013].

Актуален процесс накопления наносов в береговой зоне и для Волгоградского водохранилища, являющегося одним из крупнейших равнинных русловых водохранилищ мира и России. Оно было образовано с возведением плотины ГЭС на реке Волге у города Волгограда в 1958 г. По условиям гидрологического режима, а также по особенностям морфологического строения ложа и берегов Волгоградское водохранилище можно разделить на три участка: озерный (Волжская ГЭС – пос. Ровное), озерно-речной (пос. Ровное – г. Маркс) и речной (г. Маркс – Саратовская ГЭС). Геологическое строение и рельеф склонов водохранилища создают благоприятные условия для развития процессов их переформирования. В строении склонов правого берега преобладают плотные полускальные породы (песчаник, опока), устойчивые к действию размыва берегов водохранилища, а в склонах левобережья – менее плотные и более молодые осадочные породы (суглинки, супеси, песок) [Филиппов и др., 2009].

Первые сведения об образовании абразионно-аккумулятивных пересыпей во входных створах заливов в пределах данного водоема мы находим еще в работах 1964 [Зубенко, 1964] и 1976 гг. [Гидрометеорологический режим..., 1976]. Отметим, что заливы в пределах Волгоградского водохранилища многочисленны. Большинство из них представляет собой затопленные водами водохранилища устья балок и оврагов [Гидрометеорологический режим..., 1976; Филиппов и др., 2009].

По данным Л.П. Загора и Е.М. Синициной [1983] выделяются две группы мелководных водохранилищ. К первой группе относились мелководные заливы, глубоко вдающиеся в сушу, соединяющиеся с протоками и речками узким горлом, очень часто зарастающие воздушно-водной и погруженной высшей водной растительностью, заболачивающиеся и в меньшей мере используемые промысловыми видами рыб для нереста и нагула молоди. Дно таких заливов обычно сильно заилено. Ко второй относились заливы, соединенные с основной частью водохранилища широким устьем, где в весенний период сохраняется известная проточность, заостровное открытое мелководье, интенсивно используемое промысловыми рыбами для нереста и нагула молоди. В открытых мелководьях заиленный грунт отмечается лишь в более глубоководной части, в области распространения многолетней жесткой растительности [Загора, Синицина, 1983].

Существенное значение в биологической продуктивности водохранилищ имеет мелководная зона. Как правило, она ограничивается двухметровой изобатой, но в зависимости от характера залитых водоемов в ней встречаются участки и с большими глубинами – до 5–7 м. Площадь мелководий с глубинами до 2 м в первые десятилетия после создания водохранилища в среднем составляла 17 % общей площади водного зеркала, или 56,2 тыс. га [Загора, Синицина, 1983]. Учитывая характер распределения рыб и высшей водной растительности, к зоне мелководий Т.К. Небольсина относит и участки, расположенные на свале глубин 7-метровой изобаты, и расширяет зону мелководий до 146 тыс. га [Небольсина, 1974]. Таким образом, заливы играют значительную роль в экосистеме Волгоградского водохранилища в качестве мест нереста и нагула молоди рыб. Поэтому изучение процесса перекрытия абразионно-аккумулятивными пересыпями входных створов заливов представляет значительный научный и практический интерес.

Полевые исследования абразионно-аккумулятивных процессов во входных створах заливов и притоков водоема ведутся нами начиная с 2008 г. в ходе реализации проекта «Волжский плавучий университет» и при выполнении исследований по грантам. Однако при изучении заливов и процесса формирования пересыпей во входных створах помимо

полевого метода исследований также целесообразно использование спутниковых снимков и географических информационных систем (геоинформационных систем).

Проведение исследований в современных геоинформационных системах тесно связано с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Космическая съемка является еще одним важнейшим методом изучения изменений природной среды. Такую съемку характеризуют оперативность поступления информации, возможность регулярного повторения наблюдений при достаточно высоком разрешении [Кравцова, Шуматиев, 2005].

Для выявления закономерностей процесса формирования абразионно-аккумулятивных перемычек возникает необходимость сбора и систематизации данных о заливах водохранилища. Подобную информацию наиболее эффективно хранить в атрибутивной базе данных в геоинформационной системе.

Целью данного исследования стало создание атрибутивной базы данных заливов Волгоградского водохранилища в программе ArcGIS 9.3.

Задачи исследования включают в себя:

- создание полигонального слоя в программе Google Earth в формате kml и дальнейший его экспорт в shp-формат в программе ArcGIS;
- сбор и систематизацию данных по заливам с использованием спутниковых снимков, прежде всего, данных, характеризующих образование абразионно-аккумулятивных перемычек;
- заполнение атрибутивной базы данных;
- апробацию созданной атрибутивной базы данных в работе и анализ статистических характеристик заливов Волгоградского водохранилища.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По спутниковым снимкам в настоящем исследовании нами были изучены заливы право- и левобережья Волгоградского водохранилища. Во внимание не принимались эстуарии притоков речного участка водохранилища (притоки левобережья: Большой Караман, Малый Караман, Большой Иргиз, Тарлык, и правобережья: Курдюм, Терешка, Роща, Каменка, Черниха, Березовка и др.). Следует отметить, что процессы размыва берегов и вдольберегового транспорта наносов преобладают в основном на озерном участке, но местами встречаются и на озерно-речном (входные створы заливов Хомутинка, Мартышкин Сад и др.). В работе не учитывались мелководные лиманы, а также заливы речного и озерно-речного участков в местах, не подверженных процессу размыва берегов.

Нами использовались снимки веб-картографического сервиса Google Планета Земля [Google Планета Земля [Электронный ресурс] URL: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/> (дата обращения: 26.02.2018)] с пространственным разрешением 0,5–1,0 м. Анализ проводился по возможности по последним снимкам периода открытой воды, имеющимся в архиве программы (2010–2017 гг.). Снимки веб-картографического сервиса Google Планета Земля не являются многоспектральными, однако благодаря высокому пространственному разрешению их применение наиболее оптимально (например, в сравнении со снимками Landsat) при изучении заливов Волгоградского водохранилища. Всего было изучено 50 снимков из программы Google Планета Земля. Измерение линейных величин (ширины залива во входном створе, длины перемычки и ширины отмели) производилось с округлением до целого значения. Каждый залив прорисовывался в программе в виде полигона. Созданные полигональные объекты были сохранены в kml-формате, а затем экспортированы в shp-формат в программе ArcGIS 9.3. После этого в той же программе была заполнена атрибутивная база данных.

Сроки отделения заливов были определены по мозаикам спутниковых снимков 1986 (как наиболее раннего с наличием снимков, удовлетворяющих требованиям), 1991, 1995, 2001, 2006, 2010, 2016 гг. Мозаики были созданы в программе ScanEx Image Processor 3.6.8. В работе

применялись июльские или августовские спутниковые снимки радиометров TM (Landsat 5), ETM+ (Landsat 7) и OLI (Landsat 8), взятые из открытого для пользователей глобального архива геологической службы США (USGS) [Глобальный архив геологической службы США (USGS) [Электронный ресурс]. URL: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 29.02.18)]. Используемые нами снимки Landsat являются многоспектральными (со спектральными каналами 1–7, от видимой до дальней инфракрасной зоны). Созданные мозаики имеют комбинацию спектральных каналов 5-4-3. В этой комбинации 5 канал соответствует средней инфракрасной части спектра (1,55–1,75 мкм), 4-й – ближней инфракрасной части (0,75–0,90 мкм), а 3-й – видимой красной (0,63–0,690). Снимки характеризуются пространственным разрешением 30 м. Один кадр имеет размеры 185 км на 185 км, поэтому полностью водохранилище можно отобразить на трех базовых кадрах (за исключением снимков 2016 г., где водохранилище располагается на пяти кадрах), из которых и были составлены мозаики. В работе, таким образом, было использовано 23 снимка Landsat. Также для определения сроков отделения заливов были проанализированы снимки Google Планета Земля (начиная с 2002–2003 гг.; порядка 30 снимков).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании изучение процесса разрушения берегов непосредственно связано с изучением производных процессов вдольберегового транспорта и седиментации наносов, в частности, с исследованием линейных параметров (длины, ширины) устьевых абразионно-аккумулятивных пересыпей, процесс образования которых обусловлен вдольбереговым транспортом наносов, а также линейных и площадных параметров самих заливов (ширины заливов во входном створе, протяженности (длины), площади), чтобы в дальнейшем определить, какие из заливов имеют «предрасположенность» к перекрытию их входных створов перемычками. На рис. 1 представлен залив Длинный Липовый с полностью сформированной абразионно-аккумулятивной пересыпью во входном створе.



Рис. 1. Сформированная абразионно-аккумулятивная пересыпь во входном створе залива Длинный Липовый по снимку Google Планета Земля (06.10.2016 г.). Белой линией прорисована граница залива [Google Планета Земля [Электронный ресурс] URL: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/> (дата обращения: 26.02.2018)]
Fig. 1. Formed abrasion-accumulative jumper in entrance gate of the Dlinniy Lipoviy bay from the image Google Earth (06.10.2016). White line traced the border of the bay [Google Earthe, available at: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/>, accessed 26.02.2018]

Одним из основных параметров заливов водохранилища является ширина абразионно-аккумулятивной отмели залива (с глубинами до 5 м). Если абразионно-аккумулятивная перемычка формируется не только в мелководной, но и в глубоководной части устьевого створа (за пределами береговой отмели), то процесс отделения заливов от основной акватории водохранилища переходит в активную стадию.

Также нами было отмечено наличие связи залива и основной акватории Волгоградского водохранилища, которое может косвенно свидетельствовать о степени сформированности абразионно-аккумулятивных пересыпей во входных створах заливов. Водотоки, впадающие в залив, также являются дополнительным фактором (хоть и не связанным с ветро-волновым разрушением берегов), влияющим на процесс занесения входных створов заливов. Подобные водотоки могут способствовать либо размыванию формирующейся пересыпи (при достаточно больших скоростях течения), либо, напротив, седиментации принесенных ими наносов.

Последний параметр, который был нами изучен, – это год отделения заливов (с полностью сформированными пересыпями) для последующего определения сроков отделения заливов.

После создания полигонального векторного слоя в shp-формате и сбора данных о заливах была заполнена атрибутивная база данных. Она включила в себя 16 полей, представленных в табл. 1 и на рис. 2. Всего в базу данных вошло 198 заливов.

Таблица 1. Поля атрибутивной базы данных заливов Волгоградского водохранилища
Table 1. Fields from attributive database of bays of Volgograd reservoir

№ п/п	Название поля	Содержание поля
1	FID	Порядковый номер залива (присваивается программой автоматически)
2	Shape	Тип объекта (полигональный, линейный, точечный; поле создается программой автоматически при создании объектов слоя)
3	Название	Название залива
4	Берег	Берег (правый/левый)
5	L ВГЭС, км	Расстояние от плотины Волжской ГЭС, км
6	Участок	Участок водохранилища (озерный/озерно-речной)
7	Дата снимка	Дата снимка Google Планета Земля, по которому проводилось измерение линейных и вычисление площадных величин
8	В, м	Ширина залива во входном створе, м
9	В ААО, м	Ширина абразионно-аккумулятивной отмели залива (с глубинами до 5 м), м
10	L ААП, м	Длина абразионно-аккумулятивной пересыпи, м
11	L, м	Длина (протяженность) залива, м
12	Водотоки	Впадающие в залив водотоки
13	S, га	Площадь залива, км ²
14	Связь	Наличие связи залива и основной акватории Волгоградского водохранилища (есть/нет)
15	В ААП, м	Ширина абразионно-аккумулятивной пересыпи, м
16	Год отд.	Год, к которому сформировалась абразионно-аккумулятивная пересыпь в устьевом створе залива

Атрибуты Заливы Волгоградского водохранилища															
FID	Shape	Название	Берег	L ВГЭС, км	Участок	Дата снимка	В, м	В ААО, м	Л ААП, м	L, м	S, га	Связь	В ААП, м	Год отд	Водотоки
163	Полигон	Песковатка	Правый	36,1	Озерный	06.07.2016	707	45	28	2468	80,64	Есть	0		Временный водоток
188	Полигон	Ерзовка	Правый	11	Озерный	18.07.2017	704	18	0	6053	99,55	Есть	0		Река Ерзовка
183	Полигон	Хомутина	Левый	260	Озерно-ре	29.06.2017	673	35	25	7182	66,29	Есть	0		Временный водоток
149	Полигон	Камышинский	Правый	152,6	Озерный	01.05.2017	541	88	0	3966	140,48	Есть	0		Реки Камышинка, Е
171	Полигон	Сестренки	Правый	141,7	Озерный	01.05.2017	478	56	29	3567	66,34	Есть	0		Ионов родник
178	Полигон	Нижняя Добринка	Правый	185,4	Озерный	29.05.2017	438	26	22	2442	45,91	Есть	0		Река без названия
189	Полигон	Пичуга	Правый	17,2	Озерный	05.07.2016	391	135	4	5075	198,32	Есть	0		Река Пичуга
128	Полигон	Калмыцкий	Левый	63,6	Озерный	06.10.2016	374	26	140	2895	25,99	Есть	0		Временный водоток
190	Полигон	Горноводной	Правый	53	Озерный	13.07.2016	347	77	0	1136	16,04	Есть	0		Временный водоток
129	Полигон	Сухая Балка	Левый	37,8	Озерный	13.07.2016	346	30	118	6674	137,33	Есть	0		Временный водоток
187	Полигон	Опенье	Правый	42,4	Озерный	13.07.2016	343	162	0	2939	74,38	Есть	0		Река Опенья
191	Полигон	Горная Пролейка	Правый	65,5	Озерный	06.10.2016	324	50	7	2006	27,61	Есть	0		Река Пролейка
176	Полигон	Нижний Ураков	Правый	174,1	Озерный	29.05.2017	315	156	96	2500	26,9	Есть	0		Река без названия
161	Полигон	Дубовка	Правый	27,3	Озерный	30.07.2016	281	28	15	2185	34,97	Есть	0		Река с условным на
59	Полигон	Мордовский (Мороз	Левый	85,1	Озерный	06.10.2016	280	166	280	663	1,1	Нет	136	1995	Временный водоток
179	Полигон	Галка	Правый	194,7	Озерный	15.07.2010	280	96	15	2343	40,9	Есть	0		Река без названия
132	Полигон	Кислово	Левый	129,1	Озерный	04.09.2016	279	48	168	5640	52,42	Есть	0		Временный водоток
170	Полигон	Жипой	Правый	130,7	Озерный	04.09.2016	278	70	65	1064	21,48	Есть	0		Временный водоток
164	Полигон	Родники	Правый	56,4	Озерный	06.10.2016	273	13	10	1479	18,18	Есть	0		Временный водоток
122	Полигон	Песчаный	Левый	73,9	Озерный	06.10.2016	257	257	199	3455	30,21	Есть	0		Временный водоток
150	Полигон	Осадный	Левый	1,1	Озерный	16.04.2017	247	41	0	7158	109,27	Есть	0		Временный водоток
131	Полигон	Терновка балка	Левый	323,6	Озерный	29.06.2017	245	53	124	3022	19,45	Есть	0		Река без названия
141	Полигон	Карагачева Балка	Левый	44,5	Озерный	06.10.2016	237	237	220	3365	18,66	Есть	0		Временный водоток
55	Полигон	Бирючья Балка	Левый	69,8	Озерный	06.10.2016	230	24	230	906	4,28	Нет	99	1991	Временный водоток
180	Полигон	Даниловский	Правый	223,8	Озерный	19.09.2010	223	73	51	1058	17,24	Есть	0		Река Даниловка
145	Полигон	Мордовский (Мороз	Левый	84,3	Озерный	06.10.2016	221	221	209	3059	13,6	Есть	0		Временный водоток
127	Полигон	Большая Балка	Левый	54,6	Озерный	06.10.2016	212	30	80	3396	38	Есть	0		Временный водоток
130	Полигон	Карагачев	Левый	94	Озерный	13.10.2016	209	60	106	2921	31,85	Есть	0		Временный водоток
125	Полигон	Широкий (Широкая	Правый	133,1	Озерный	11.04.2015	208	41	69	1356	11,38	Есть	0		Временный водоток
107	Полигон	Шарова балка верх	Левый	13,2	Озерный	30.07.2016	207	190	207	4981	4,2	Есть	308	2017	Временный водоток
104	Полигон	Морозовский	Правый	257,6	Озерный	25.04.2015	207	12	207	1173	10,03	Есть	18	2015	Река Морозовка
48	Полигон	Залив в 5,1 км к с-в	Левый	21,6	Озерный	30.07.2016	205	153	205	3358	7,58	Есть	93	1991	Временный водоток
175	Полигон	Сухая Речка	Правый	171,4	Озерный	29.05.2017	205	20	18	1882	29,82	Есть	0		Временный водоток
77	Полигон	Залив в 4 км к с-в о	Левый	299,8	Озерно-ре	29.06.2017	202	134	202	2129	12,19	Нет	16	1995	Временный водоток
64	Полигон	Залив в 3,5 км к ю	Левый	125,4	Озерный	04.09.2016	200	149	200	3109	12,63	Есть	132	2000	Временный водоток
174	Полигон	Терновка	Правый	167,7	Озерный	29.05.2017	186	41	16	1586	17,63	Есть	0		Река без названия
32	Полигон	Большой	Правый	196	Озерный	15.07.2010	179	56	196	1164	8,52	Есть	61	2006	Временный водоток
124	Полигон	Водяной	Правый	111,4	Озерный	22.08.2010	179	20	69	912	6,51	Есть	0		Временный водоток
50	Полигон	Бирючий, верхнее	Левый	25,4	Озерный	30.07.2016	176	140	176	2256	10,69	Есть	122	2016	Временный водоток
76	Полигон	Залив в 7,8 км к с-з	Левый	215,7	Озерный	19.09.2010	169	150	169	462	0,75	Нет	57	1986	Временный водоток
177	Полигон	Верхний Ураков	Правый	174,7	Озерный	29.05.2017	162	39	28	2053	22,17	Есть	0		Река без названия
140	Полигон	Мочаги	Левый	30,9	Озерный	30.07.2016	159	159	144	6194	22,6	Есть	0		Временный водоток
7	Полигон	Крестинская Ба	Правый	45,4	Озерный	13.07.2016	157	42	157	931	5,28	Нет	51	1991	Временный водоток
57	Полигон	Терновый, среднее	Левый	81,6	Озерный	06.10.2016	155	0	0	1132	2,15	Нет	122	2006	Временный водоток
184	Полигон	Абсолютный	Левый	92,7	Озерный	06.10.2016	154	46	29	3581	44,4	Есть	0		Временный водоток
III															
Записи: 14 9 11 Показать: Все Выбранные записи (0 из 198 Выбранные) Опции															

Рис. 2. Фрагмент атрибутивной базы данных заливов Волгоградского водохранилища
Fig. 2. The fragment from attributive database of bays of Volgograd reservoir

Последние два поля заполнялись для заливов с полностью (или практически полностью) сформированной перемычкой во входном створе.

После заполнения атрибутивной базы данных была проведена апробация ее работы. На рис. 2 приведен пример расширенной сортировки (инструмент «Расширенная сортировка» программы ArcGIS 9.3, позволяющий провести сортировку по 2 и более полям) нашей атрибутивной базы данных заливов Волгоградского водохранилища. Данные были сначала отсортированы по ширине залива во входном створе (В, м) от максимального к минимальному значению, затем – по берегу (левый/правый). Данная сортировка позволяет сразу выявить отдельно для каждого из берегов ширину залива во входном створе.

По каждому отдельному визуализированному на карте заливу может быть получена атрибутивная информация (инструмент «Идентификация» ArcGIS 9.3). Например, по заливу Другалка, согласно полученным при идентификации данным, можно сделать вывод, что залив активно отделяется от основной акватории Волгоградского водохранилища (рис. 3).

В некоторых случаях возникает необходимость использования векторного точечного слоя, например, при классификации объектов или при построении локализованных диаграмм. Поэтому полигональные слои были переведены в точечные с помощью инструментов модуля ArcToolbox: Управление данными – Пространственные объекты – Объект в точку [ArcGIS 9. Геообработка в ArcGIS, 2004]. Процесс перевода полигонального

слоя заливов Волгоградского водохранилища в точечный (слой «Заливы Волгоградского водохранилища точки») приведен на рис. 4. У точечного слоя заливов сохранилась та же таблица атрибутов, что и у полигонального.

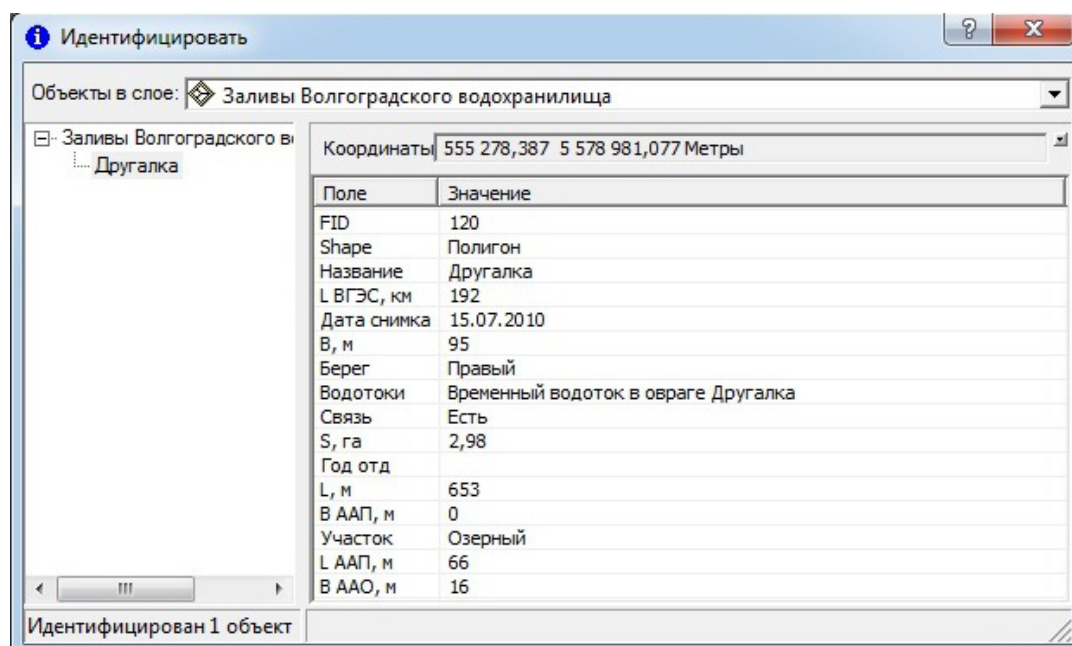


Рис. 3. Таблица идентификации залива Другалка

Fig. 3. The identification table of the Drugalka bay

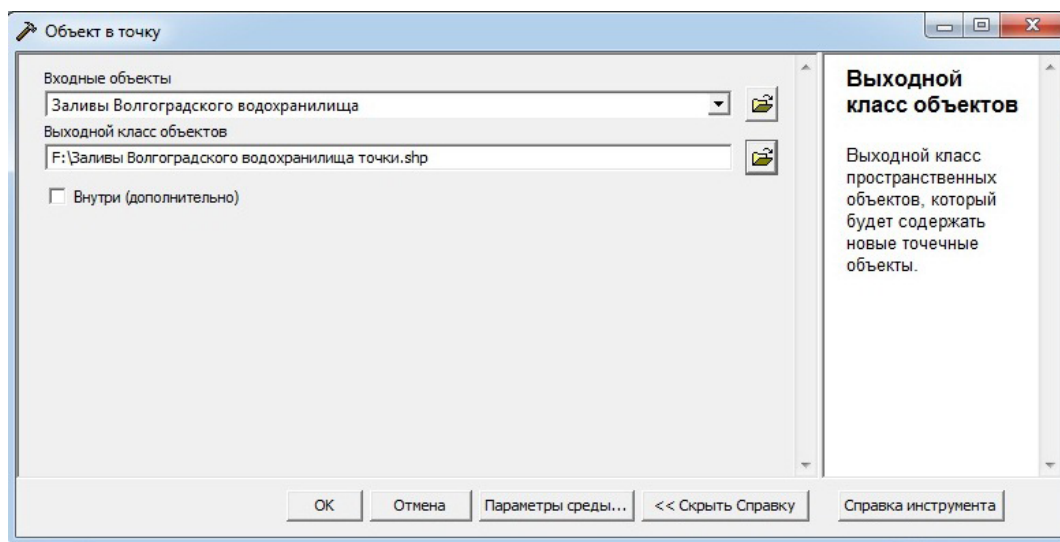


Рис. 4. Процесс перевода полигонального слоя заливов
Волгоградского водохранилища в точечный

Fig. 4. The process of translating the polygonal layer of the bays
of the Volgograd Reservoir into a point one

Анализ статистических характеристик заливов Волгоградского водохранилища приведен в табл. 2. Согласно табл. 2, для таких параметров, как ширина залива во входном створе, протяженность и площадь залива, среднеквадратическое отклонение больше, чем

среднеарифметическое значение тех же параметров, и величина коэффициента вариации больше 100 %, следовательно, распределение полученных результатов отличается от нормального и не может быть описано данными статистическими характеристиками. И разброс значений полученных данных по этим полям очень значительный.

Таблица 2. Статистические характеристики заливов Волгоградского водохранилища
Table 2. Statistical characteristics of bays of Volgograd reservoir

№ п/п	Название поля, единица измерения	Максимальное значение (примеры заливов)	Среднее значение (примеры заливов)	Минимальное значение (примеры заливов)	Среднеквад- ратическое отклонение / дисперсия / коэффициент вариации, %
1	В, м	1450,0 (Еруслан)	139,0 (Длинная Бал- ка, Трубинская Речка)	19,0 (Мордово)	162,8 / 26503,8 / 117,1
2	В ААО, м	295,0 (Еруслан)	135,0 (Пичуга)	3,0 (Крутой)	51,9 / 2693,6 / 38,4
3	L ААП, м	220,0 (Карагачева Балка)	103,0 (Котловый)	0,0 (Ерзовка, Горноводяной)	58,1 / 3375,6 / 56,4
4	L, м	43000,0 (Еруслан)	1356,0 (Широкий)	21,0 (залив в 2,8 км к юго-западу от залива Пичуга)	3412,2 / 11643108,8 / 251,6
5	S, га	9915,7 (Еруслан)	67,3 (Залив в 1,8 км к северу от залива Осадный)	0,0 (залив в 2,8 км к юго-западу от залива Пичуга)	709,5 / 503390,3 / 1054,2
6	В ААП*, м	8,0 (Глинский Яр)	62,0 (Пустой Меловой)	308,0 (Шарова балка, верхнее ответвление)	49,3 / 2430,5 / 79,5

Примечание. * – только для заливов с полностью (или практически полностью) сформированной пересыпью.

Созданная атрибутивная база данных в дальнейшем будет наполняться и другой актуальной информацией, полученной по спутниковым снимкам и в ходе полевых исследований. В нее могут войти следующие поля: максимальная и средняя глубина залива, температура, гидрохимические показатели (прежде всего содержание в воде растворенного кислорода и минерализация), информация о видовом составе высшей водной растительности, объем залива, уровень воды в заливе по годам, площадь надводной части абразионно-аккумулятивной пересыпи во входных створах заливов со сформированной пересыпью. По данным атрибутивной таблицы будет возможна последующая классификация заливов Волгоградского водохранилища.

ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы была заполнена атрибутивная база данных заливов Волгоградского водохранилища в геоинформационной системе с использованием спутниковых данных. Предварительно, по снимкам Google Планета Земля был создан полигональный слой в формате kml, который в дальнейшем был экспортирован в shp-формат в программе ArcGIS 9.3. По снимкам Google Планета Земля были собраны данные по заливам, включающие 16 параметров, и, прежде всего, параметры, характеризующие образование абразионно-аккумулятивных перемычек. После заполнения атрибутивной базы данных была проведена апробация ее работы. Нами были проанализированы статистические характеристики заливов Волгоградского водохранилища, включая среднеквадратическое отклонение, дисперсию и коэффициент вариации. Было выявлено, что распределение полученных результатов для таких параметров, как ширина залива во входном створе, протяженность и площадь залива, отличается от нормального. Разброс значений полученных данных по этим полям очень значительный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Волгоградское водохранилище / Под ред. В.А. Знаменского и Б.И. Ушакова. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 84 с.
2. *Закора Л.П., Синицина Е.М.* Морфологическая характеристика и зарастаемость мелководной зоны Волгоградского водохранилища // Характеристика мелководной зоны Волгоградского водохранилища и перспективы ее использования в рыбоводных целях: Сб. науч. тр. Л., 1983. Вып. 199. С. 4–15.
3. *Зубенко Ф.С.* Берега Волгоградского водохранилища // Материалы к изучению перестроения берегов Волгоградского водохранилища. М.; Л.: Наука, 1964. С. 78–124.
4. *Кравцова В.И., Шуматиев В.В.* Новые подходы к обработке разновременных космических снимков на примере исследования динамики дельты Урала // Геоинформатика. 2005. № 3. С. 52–61.
5. *Назаров Н.Н.* О движении и аккумуляции наносов в береговой зоне Камских водохранилищ на современной стадии их развития // 28-е пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2013. С. 32–42.
6. *Небольсина Т.К.* Общая характеристика мелководной зоны Волгоградского водохранилища // Изв. ГосНИОРХ. 1974. Т. 89. С. 151–158.
7. *Филиппов О.В., Золотарев Д.В., Солодовников Д.А.* Экологические проблемы заливов и устьевых притоков Волгоградского водохранилища в условиях абразии и вдольберегового транспорта наносов // Проблемы комплексного исследования Волгоградского водохранилища: Сб. науч. ст. Волгоград: Волгоград. науч. изд-во, 2009. С. 119–142.
8. ArcGIS 9. Геообработка в ArcGIS. М.: Дата+, 2004. 358 с.

REFERENCES

1. ArcGIS 9. Geoprocessing in ArcGIS. Moscow: Data +, 2004. 358 p.
2. *Filippov O.V., Zolotarev D.V., Solodovnikov D.A.* Ecological problems of bays and estuarial tributaries of the Volgograd reservoir in conditions of abrasion and alongshore sediment transport. Problemy kompleksnogo issledovaniya Volgogradskogo vodohranilishcha: Sb. nauch. st. Volgograd: Volgogradskoe nauchnoe izdatel'stvo, 2009. P. 119–142 (in Russian).
3. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of USSR. Volgograd reservoir / V.A. Znamenskii, B.I. Ushakov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976. 84 p. (in Russian).

4. *Kravcova V.I., Shumatiev V.V.* New approaches to the processing of different-time space images on the example of the investigation dynamic of the delta of the Urals. *Geoinformatika*. 2005. No 3. P. 52–61 (in Russian).
5. *Nazarov N.N.* About movement and accumulation of sediments in the coastal zone of Kama reservoirs at the modern stage of their development. 28 plenarnoe mezhvuzovskoe koordinacionnoe soveshhanie po probleme jerozionnyh, ruslovyh i ust'evykh processov. Perm': Permskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet, 2013. P. 32–42 (in Russian).
6. *Nebol'sina T.K.* The total characteristic of the shallow water zone of the Volgograd reservoir. *Izv. GosNIORH*. 1974. T. 89. P. 151–158 (in Russian).
7. *Zakora L.P., Sinicina E.M.* Morphological characteristic and overgrowth of the shallow water zone of the Volgograd reservoir. *Harakteristika melkovodnoy zony Volgogradskogo vodohranilishcha i perspektivy ee ispolzovaniya v rybovodnyh celyah: Sb. nauch. trudov*. Leningrad, 1983. V. 199. P. 4–15 (in Russian).
8. *Zubenko F.S.* Coasts of the Volgograd reservoir. *Materialy k izucheniju pereformirovaniya beregov Volgogradskogo vodohranilishha*. Moscow; Leningrad: Nauka, 1964. P. 78–124 (in Russian).

Колесников А.А.¹, Кикин П.М.², Середович С.В.³

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ГЕОПОЗИЦИОННОЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Наибольшим сегментом рынка систем дополненной реальности является сегмент приложений для мобильных устройств. Ключевыми компонентами приложения геопозиционной дополненной реальности являются данные, получаемые с различных датчиков устройства, на котором оно работает, а также методы по обработке этих данных. Минимально необходимым набором данных для реализации систем геопозиционной дополненной реальности являются данные компаса, гироскопа и GPS/ГЛОНАСС.

Однако используемые устройства имеют ряд недостатков, вытекающих из их мобильности и малых габаритов. Таковыми являются: ограниченный заряд портативного источника питания, низкая, в сравнении со стационарными системами, вычислительная мощность, слабая система охлаждения, ограниченный набор встроенных датчиков и сенсоров.

Вследствие этих недостатков точность получаемых данных не всегда удовлетворяет заданным требованиям, а их обработка требует существенных вычислительных ресурсов, что негативно влияет на энергопотребление и общую производительность приложения. Видимые проявления этих недостатков заключаются в низкой стабильности позиционирования трехмерных объектов в виртуальном пространстве, выражающейся в их заметном «дрожании», а также в быстром расходе энергии батареи устройства.

Данная статья детально рассматривает возможные способы решения этих проблем путем использования различных методов анализа и обработки получаемых данных. В качестве основной платформы исследования используется среда разработки 3D приложений Unity. В статье приведен ряд рекомендаций по методам обработки данных с использованием различных алгоритмов сглаживания и уменьшения шумов. Проведен анализ данных, получаемых с датчиков смартфона, с целью определения удельного веса каждого из них по отношению энергопотребления к вносимой погрешности в результаты измерений. Рассмотрены преимущества применения алгоритмов распознавания активности пользователей в целях уменьшения энергопотребления, а также проанализированы возможности использования нейронных сетей в целях детекции и сегментации объектов на изображениях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геопозиционная дополненная реальность, смартфон, гироскоп, акселерометр, компас.

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плеханова, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия, e-mail: alexeykw@mail.ru

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плеханова, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия, e-mail: it-technologies@yandex.ru

³ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плеханова, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия, e-mail: npcip@yandex.ru

Alexey A. Kolesnikov¹, Pavel M. Kikin², Sergey V. Seredovich³

USING THE SYNERGY METHOD FOR IMPROVEMENT OF THE ACCURACY OF LOCATION BASED AUGMENTED REALITY

ABSTRACT

The key components of a location-based augmented reality application are data collected from various sensors and methods for processing these data.

However, the accuracy of the sensors does not always meets the requirements, processing the collected data require significant computational resources that have a negative effect to the power consumption and overall performance of the application.

The article considers possible ways of solving these problems by using various data analyses and processing methods.

One of the largest segments of augmented reality market is mobile software segment, which is mainly represented by software for smartphones.

At the same time, most of the used devices have disadvantages deriving from their small size and mobility.

These are: limited charge of a portable power source, low performance in comparison with desktop computers, inefficient cooling system and limited set of built-in sensors.

Augmented reality applications are focused on visualization of supplemented data at the right time and in the right place.

Location-based augmented reality relates to technologies that use the device capabilities to determine its spatial position based on GNSS data, as well as compass, gyro, depth camera and other sensors displaying the augmented reality around.

The need to research and analyse the data obtained from smartphone sensors is caused by the fact that in the location-based augmented reality application, developed by the authors, there were problems with the accuracy and stability of the visualization of 3D objects in virtual space.

Data, obtained from the smartphone sensors (compass, gyro, accelerometer, GPS / GLONASS), are used to position the virtual camera in a 3D scene with information tabs.

Since the visual "jitter" of 3D objects is significant, it was necessary to find out which of the sensors deals the greatest error.

Due to the lack of ready-made solutions to create location-based AR systems, the authors met problems associated with extremely high power consumption, accuracy and stability of visualization of augmented reality elements, and need of intellectual use of smartphone sensors, disabling those that can be ignored.

Unity software, which has all necessary tools for obtaining data from smartphone sensors, was used to analyze the data received from the smartphone, because it

Based on the analysis of the data received from various smartphone sensors, a number of recommendations on how to work with these data and use algorithms to smooth and reduce noise within the creation of location-based augmented reality application was made.

KEYWORDS: location based AR, smartphone, gyro, accelerometer, compass.

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotnogo str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia,
e-mail: alexeykw@mail.ru

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotnogo str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia,
e-mail: it-technologies@yandex.ru

³ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotnogo str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia,
e-mail: npcip@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

Системы дополненной реальности являются сравнительно новым, однако быстро развивающимся направлением IT-индустрии и смежных областей промышленности, которое расположено на стыке множества различных технологий и областей науки [Яковлев, Пустов, 2013; Кикин и др., 2017].

Одним из самых больших сегментов рынка программного обеспечения (ПО) систем дополненной реальности является сегмент ПО для мобильных устройств, представленный главным образом ПО для смартфонов (в данной статье для обозначения дополненной реальности будет использоваться устоявшаяся в международном сообществе аббревиатура AR, происходящая от английского «augmented reality»). Также большие надежды и перспективы дополненной реальности связаны с использованием устройств типа handsfree, таких как очки дополненной реальности, которые имеют множество преимуществ для реализации ПО дополненной реальности, будучи изготовленными специально для этих целей [Яковлев, Пустов, 2013; Колесников и др., 2016].

Однако и те и другие перспективные устройства имеют недостаточные характеристики для реализации приложений геопозиционной дополненной реальности, вытекающие из их мобильности и малых габаритов. Таковыми являются:

- ограниченный заряд портативного источника питания;
- низкая, в сравнении со стационарными системами, вычислительная мощность;
- слабая система охлаждения;
- ограниченный набор встроенных датчиков и сенсоров;
- ограниченные возможности встроенных датчиков и сенсоров [Колесников и др., 2016; Colomar et al., 2012; Chen et al., 2017; Kok et al., 2017; Quan, Piao, 2017; Restuccia et al., 2017].

Разработчикам AR приложений для таких устройств необходимо учитывать эти недостатки и использовать такие методы и технологии, которые в условиях недостаточности данных способны реализовывать поставленные цели малыми вычислительными мощностями с требуемой точностью.

Верхний уровень классификации технологий визуализации дополненной реальности можно разделить на два основных направления.

Первое – это технологии, визуализирующие дополнительные объекты, привязывая их к распознаваемым, через видеокамеру, образам либо объектам. В английской терминологии они определяются наиболее распространенным в среде разработчиков термином «Marker based» или логически более правильным, но менее распространенным «Imagery Base». Ведь в группу распознаваемых объектов могут входить не только маркеры, но также обычные изображения и даже трехмерные объекты. В данной статье такие технологии будут называться «маркерные».

Второе направление относится к технологиям, которые для отображения дополненной реальности используют возможности устройства определять свое положение в пространстве на основе данных GNSS, а также компаса и гироскопа. Для таких технологий в международном сообществе устоялось понятие «Location based». Далее по тексту для их обозначения авторы будут использовать термин «геопозиционные».

Наиболее распространенной технологией при реализации AR приложений на сегодняшний день является маркерная, что связано с достаточной изученностью и проработанностью технологий распознавания образов. Однако такие приложения имеют существенные ограничения в применении из-за необходимости наличия маркеров для визуализации дополненной реальности. Для таких целей, например, как визуализация справочно-картографической информации, такой способ не подходит. Реализация такой задачи этой технологией потребовала бы нанесения маркеров на абсолютно все объекты, для которых понадобилось бы визуализировать дополнительную инфор-

мацию, что сложно реализуемо, если речь идет о площадях размером хотя бы с район города [Bonnet et al., 2009; Chen, 2013; Quan, Piao, 2017; Restuccia et al., 2017].

В связи с этим авторами данной статьи в ходе реализации приложения для визуализации справочно-картографических данных в формате дополненной реальности было принято решение использовать геопозиционную технологию.

По причине отсутствия готовых решений, таких как программные библиотеки или наборы разработчиков программного обеспечения, для построения систем геопозиционной дополненной реальности был разработан собственный программный модуль, отвечающий за позиционирование объектов дополненной реальности в соответствии с их реальными географическими координатами. Позиционирование AR объектов в разработанном модуле было реализовано путем определения координат и направления «взгляда» видеокамеры мобильного устройства, на котором запущено приложение. Для определения координат и слежения за их изменением использовались встроенные GPS приемник и акселерометр, а направление «взгляда» камеры рассчитывалось на основе данных, получаемых с компаса и гироскопа устройства.

Однако в результате тестирования этого приложения были выявлены его существенные недостатки, связанные с чрезвычайно высоким энергопотреблением устройства, на котором оно функционирует, а также с низкой точностью и стабильностью отображения элементов дополненной реальности. Очевидно, что в условиях отсутствия какой-либо фильтрации и обработки получаемых с датчиков данных проблемы позиционирования AR объектов были вызваны их недостаточной точностью и наличием шумов в получаемых измерениях.

Для возможности устранения недостатков, связанных с точностью и стабильностью позиционирования AR объектов, было необходимо провести исследование получаемых с датчиков данных и возможных способов уменьшения влияния шумов и погрешностей измерений путем применения различных фильтрующих алгоритмов, а также за счет синергетического подхода к реализации системы дополненной реальности, совместно используя технологии геопозиционной AR вместе с маркерными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения задуманного исследования авторами было разработано специальное приложение, позволяющее производить измерения с различных датчиков мобильных устройств и применять к ним различные фильтры.

В связи с тем что основным ПО для разработки AR приложения был Unity 3D, в котором имеются классы для получения данных практически от всех датчиков смартфона как в обработанном, так и в сыром виде, то он же был выбран и для создания мобильного приложения. Основным языком программирования выступал C#, а визуализация данных в виде графиков производилась при помощи ПО Anaconda и языка программирования Python. В качестве мобильного устройства выступил смартфон фирмы Samsung модель Galaxy S3, обладающий всеми необходимыми датчиками. Для проверки его функциональной работоспособности была выполнена серия измерений со всех датчиков на трех одинаковых устройствах Samsung Galaxy S3, показавшая идентичные результаты в одинаковых условиях [Adler et al., 2015; Wu et al., 2016; Wu, Pei, 2017].

Первым исследуемым датчиком смартфона стал компас.

Используя класс Unity Input.Compass, можно получить следующие данные:

- headingAccuracy – точность считывания направления в градусах;
- magneticHeading – направление в градусах относительно Северного магнитного полюса;
- rawVector – необработанные геомагнитные данные, измеряемые в микротесла;
- trueHeading – направление в градусах относительно географического Северного полюса.

С использованием данного класса был реализован программный метод, который создавал массив из полученных с компаса данных и затем сохранял его в текстовый файл для дальнейшего анализа.

Первым этапом исследования было выполнено две серии измерений в неподвижном состоянии устройства при отличающихся на 90 градусов углах поворота в горизонтальной плоскости. Серии измерений состояли из 3000 показаний компаса с интервалом в 0,2 секунды.

Выполнив сравнение колонок истинного и магнитного севера, определили, что они идентичны, и все последующие расчеты описывали для значений колонки направления на истинный север (trueHeading). Базовые статистические показатели для этой колонки в виде таблицы и графиков типа boxplot и plot приведены на рис. 1. Вертикальная ось отображает результаты измерения компаса в градусах от 0 до 360, горизонтальная – нумерацию измерений.

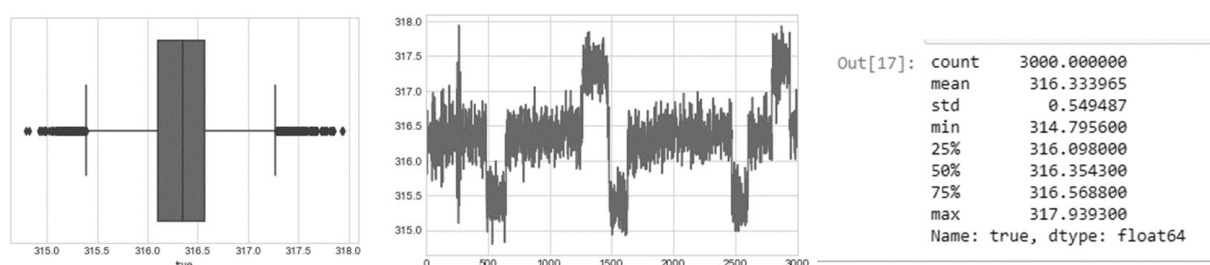


Рис. 1. Графическое представление данных компаса
Fig. 1. Graphical representation of compass data

По графикам виден существенный разброс измерений, что означает необходимость выполнения сглаживания и фильтрации данных. Поскольку набор данных был получен сразу после включения приложения, без выполнения специальной калибровки компаса устройства, было решено выполнить повторный сбор данных после проведения калибровки с целью тестирования ее влияния на результаты измерений. Калибровка компаса представляет собой перемещение смартфона по траектории фигуры в виде цифры 8 [Wu et al., 2016; Wu, Pei, 2017].

По полученным измерениям видно, что калибровка уменьшает средний разброс более чем в два раза (рис. 2). Горизонтальная ось отображает результаты измерения компаса в градусах от 0 до 360.

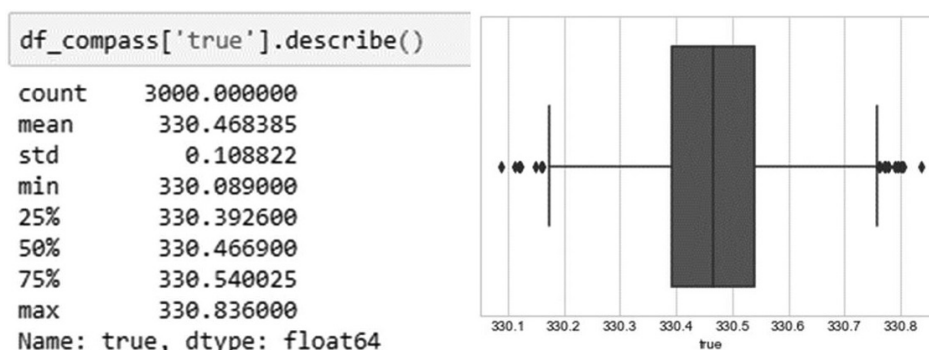


Рис. 2. Визуализация данных, полученных после калибровки
Fig. 2. Graphical representation of calibrated compass data

Сглаживание с использованием медианного фильтра (скользящее окно из 11 значений), экспоненциального сглаживания (скользящее окно из 25 значений) и вычисления среднего (скользящее окно из 61 значения) дали следующие результаты, представленные на рис. 3. Вертикальная ось отображает результаты измерения компаса в градусах от 0 до 360, горизонтальная – нумерацию измерений.

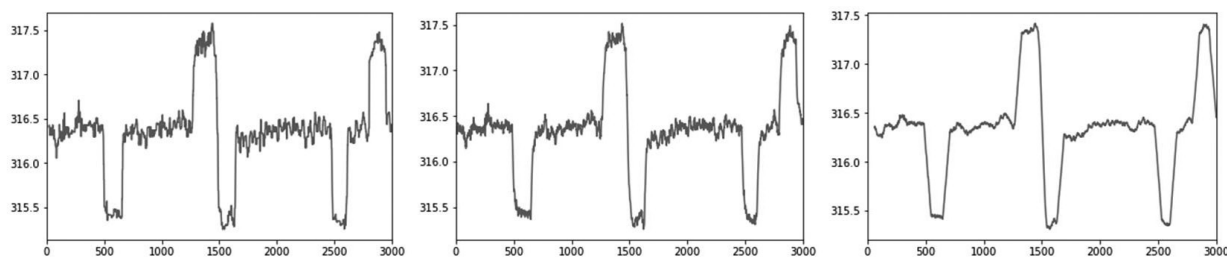


Рис. 3. Результаты обработки данных с помощью фильтров разных типов
(медианный, экспоненциальный, по среднему значению)

Fig. 3. The results of data processing by means of filters of different types
(median, exponential, by average value)

Также был опробован экспоненциальный фильтр с двумя проходами и коэффициентом фильтрации 0,03 для первого прохода и 0,01 для второго.

По графикам видно, что для всех примененных способов сглаживания из-за большого разброса значений измеряемого параметра основное влияние имеет количество обрабатываемых значений.

По результатам анализа влияния различных фильтров на качество конечных данных было принято решение обрабатывать данные, получаемые с компаса, при помощи экспоненциального фильтра с двумя проходами и предварительным отбрасыванием значений, отличающихся от трех предыдущих более чем на 75 % (рис. 4).

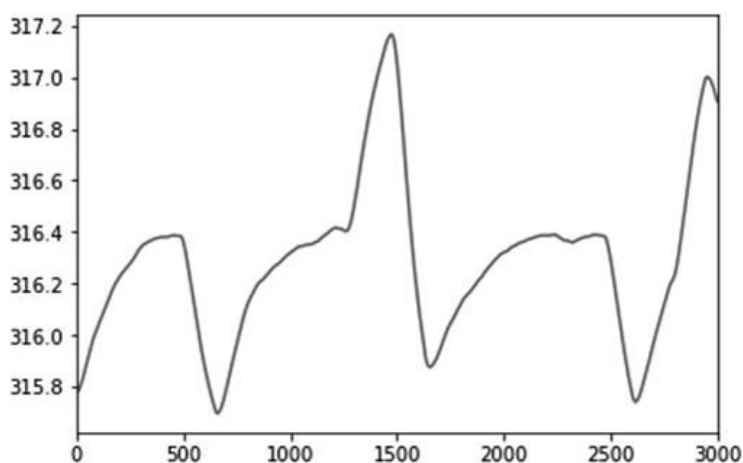


Рис. 4. Применение low-pass фильтра

Fig. 4. Applying a low-pass filter

Далее был выполнен анализ данных, получаемых с гироскопа и акселерометра в состоянии покоя. Также были собраны 3000 показаний каждого из компонентов с интервалом в 0,2 секунды [Bonnet et al., 2009; Chen, 2013; Groves, 2013]. Данные по ги-

роскопу были преобразованы в углы в градусах. Для визуализации на одном графике измерения по оси z были масштабированы и совместно с двумя другими осями отображены на графике [Кикин и др., 2017]. Статистика по измерениям для трех осей представлена на рис. 5. По вертикальной оси представлены значения гироскопа в градусах, по горизонтальной – нумерация измерений.

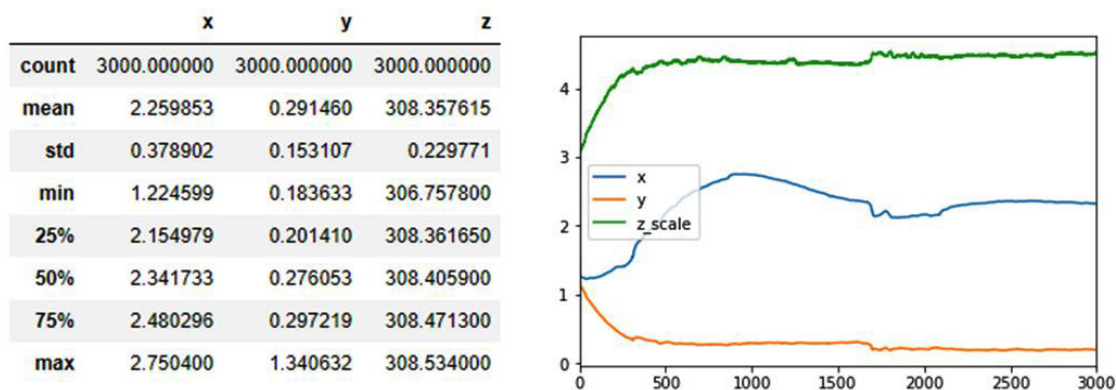


Рис. 5. Статистика по результатам измерений гироскопа
Fig. 5. Statistics on the results of gyro measurements

Отбросив первые 500 значений, для того чтобы убрать из эксперимента некорректные измерения, связанные с инициализацией устройства и запуском программы, получили следующую статистику, которая говорит о том, что точность измерений составляет примерно 0,33 градуса.

Данная точность получаемых данных позволяет отображать AR объекты без видимых глазу дрожаний и является достаточной для приложения дополненной реальности, соответственно дополнительная обработка данных гироскопа не требуется.

Следующим тестируемым датчиком стал акселерометр. По умолчанию единицы измерения акселерометра – метры в секунду в квадрате. Данные представлены на рис. 6. Вертикальная ось отображает результаты измерения акселерометра в метрах в секунду в квадрате, горизонтальная – нумерацию измерений.

По статистическим показателям видно, что отклонение по осям акселерометра в состоянии покоя не превышает 0,005 м/с². Такое отклонение также является несущественным, в связи с чем результаты измерений акселерометра не требуют дополнительной обработки.

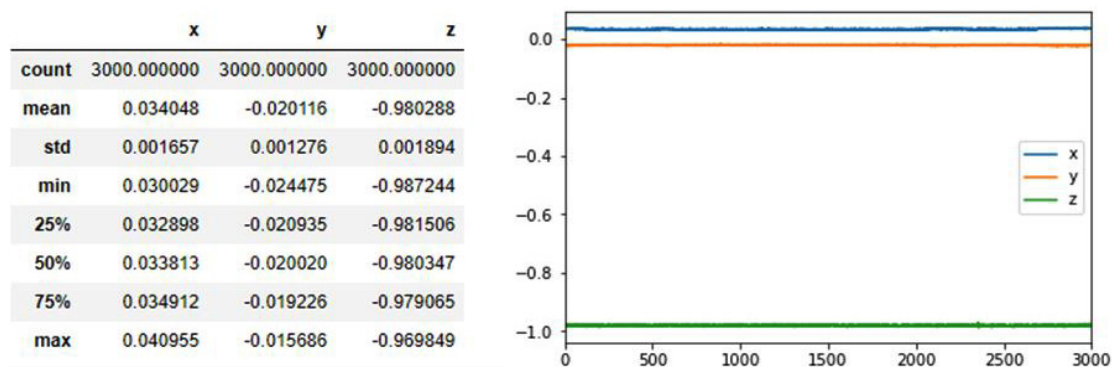


Рис. 6. Статистика и визуализация данных акселерометра
Fig. 6. Statistics on the results of accelerometer measurements

Следующим недостатком разработанного программного модуля, для устранения которого также было решено провести исследования, было чрезмерное энергопотребление. Одним из способов уменьшить энергопотребление является определение вида активности пользователя приложения (сидит, лежит, идет, бежит, едет в машине или на общественном транспорте и т. д.), что позволяет определить его относительное положение в пространстве и динамику перемещения смартфона. Зная вид активности, можно изменять частоту опроса датчиков, продолжительность актуальности результатов запроса окружающих пространственных объектов и т. п. Распознавание вида активности человека (**human activity recognition**) может осуществляться разными способами, как алгоритмически, так и с помощью моделей машинного обучения. Например, используя алгоритм кластеризации Kmeans, можно достаточно четко разделить группы активностей на классы. В результате реализации такого алгоритма в виде приложения был проведен эксперимент по определению видов активности пользователя. Результаты эксперимента представлены на рис. 7. Различным диапазонам данных, полученных в результате применения алгоритма выделения главных компонент PCA к результатам измерений датчиков устройства, соответствуют различные виды активности пользователя, которые на рисунке закрашены разным цветом. Данные по осям представлены в условных относительных единицах.

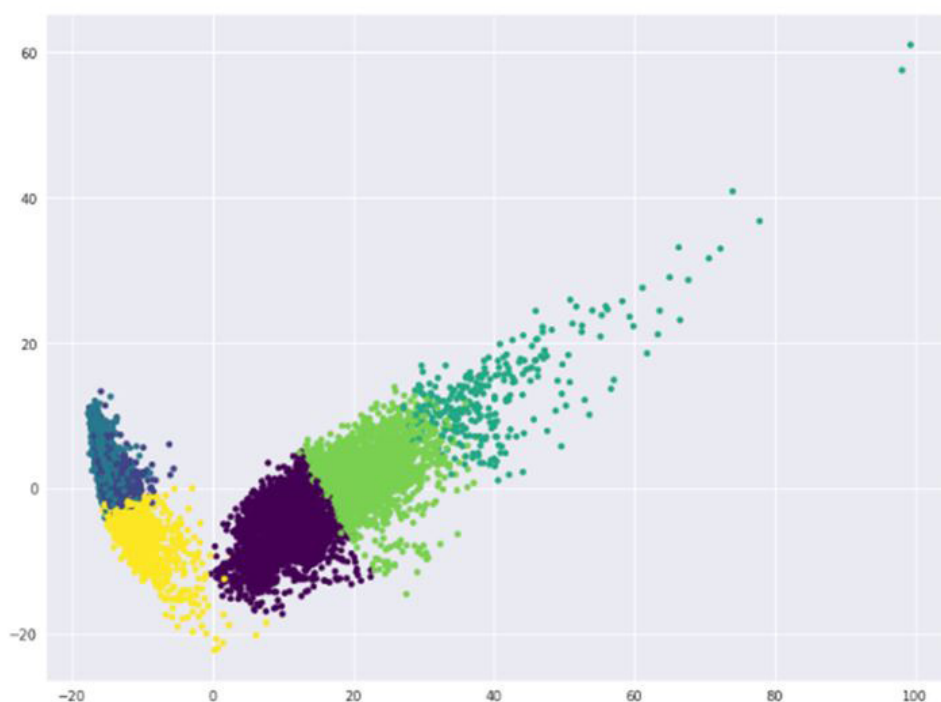


Рис. 7. Визуализация активности пользователя по данным датчиков смартфона в проекции на две главные компоненты
Fig. 7. Graphical representation of user activity based on smartphone sensor data in a projection on two main components

При сравнении полученных результатов с реальной активностью пользователя были сделаны выводы о необходимости дальнейшей доработки используемого алгоритма и проведения повторных тестов, так как точность определения вида активности составляла примерно 65 %, что можно считать недостаточным.

Как было сказано в начале статьи, еще одним способом улучшения технологии дополненной реальности служит синергетический подход, заключающийся в совместном применении геопозиционной и маркерной технологий дополненной реальности. Ключевыми средствами маркерной технологии являются методы компьютерного зрения, «детектирование» и «сегментация» объектов на получаемом с камеры мобильного устройства изображении. Для их реализации в создаваемом приложении геопозиционной AR были рассмотрены возможности использования нейронных сетей в среде Unity 3D.

Для Unity наиболее пригодным для разработки приложений является плагин TFSharp. Он представляет собой экспериментальный плагин, основанный на другом плагине, предназначенном для возможности использования открытой программной библиотеки для машинного обучения tensorflow в языке программирования C#. Он устанавливается как стандартный программный пакет Unity 3D и для работы требует предобученной нейронной сети в формате bytes (данный формат является freeze моделью на основе чекпоинта весов сети и ее структуры). Разработчики рекомендуют для тренировки и экспорта модели использовать язык программирования Python с Tensorflow. Также вместо Python с Tensorflow возможно было использовать другую открытую нейросетевую библиотеку Keras, однако это потребовало выполнения дополнительных действий для экспорта созданной модели в Unity, в связи с чем от этой идеи было решено отказаться.

На момент написания статьи было реализовано отдельное приложение на основе Unity 3D, использующее нейронную сеть для распознавания и детектирования объектов реального мира при помощи камеры смартфона. Нейронная сеть была обучена распознавать легковые автомобили. В условиях хорошего освещения и видимости было распознано 95 % объектов на расстоянии до 50 м, что является высоким показателем. Однако этих результатов недостаточно, чтобы однозначно выявить применимость данной технологии в AR приложениях. Требуется проведение дополнительных исследований данной технологии на способность распознавания прочих объектов в различных условиях видимости и с больших расстояний. Также необходимо разработать алгоритм, который позволит объединить в достижении общей цели технологии геопозиционной и маркерной дополненной реальности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе проведенного исследования был сделан ряд рекомендаций и выводов, которые стоит учитывать при создании приложения геопозиционной дополненной реальности:

- данные GPS/ГЛОНАСС датчика имеют значительный разброс (сотни сантиметров), в связи с этим рекомендуется производить повторные запросы данных через значительные интервалы времени, от 1 до 20 секунд в зависимости от среднего темпа движения пользователя, настроек радиуса запроса данных и плотности отображаемых объектов;
- при обработке данных компаса следует использовать экспоненциальный фильтр с двумя проходами и предварительным отбрасыванием значений, отличающихся от трех предыдущих более чем на 75 %;
- дополнительная обработка данных, получаемых с гироскопа и акселерометра, не требуется в связи с их высокой точностью;
- для уменьшения энергопотребления можно использовать систему определения вида активности пользователя. При этом важно учитывать особенности работы конкретного AR приложения, так как в определенных условиях потребление энергии системы распознавания активности пользователя может оказаться выше получаемых от ее использования

преимуществ. Авторам статьи на момент ее написания не удалось добиться достаточной точности распознавания, что требует доработки используемого алгоритма и более тщательного подбора параметров.

– наиболее значимым шагом на пути к существенному улучшению возможностей и качества приложений дополненной реальности видится совместное использование геопозиционной и маркерной технологии на основе нейронных сетей. Предварительные исследования использования нейронных сетей для детектирования объектов показали хорошие результаты, однако требуется проведение дополнительных исследований по распознаванию большего количества объектов в различных условиях видимости. Также требуется разработка алгоритма, который позволит объединить в достижении общей цели технологии геопозиционной и маркерной дополненной реальности.

ВЫВОДЫ

Приведенные рекомендации являются лишь частью исследования, в которой не учитываются энергопотребление датчиков, паттерны движений пользователя, характер отображаемых данных. Более комплексный подход требует совместного использования обработанных данных с датчиков мобильного устройства, распознавания и корректировки параметров опроса датчиков и внешних API. Использование нейронных сетей для анализа получаемого с камеры изображения в данный момент для широкого круга приложений достаточно сильно затруднено сложностью тренировки сети и ограничениями на встраивание готовых моделей в типовые приложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кикин П.М., Колесников А.А., Комиссарова Е.В., Грищенко Д.В.* Анализ данных датчиков смартфона при разработке приложения геопозиционной дополненной реальности // Междунар. науч.-практ. конф. «От карты прошлого – к карте будущего», 28–30 ноября 2017, г. Пермь – г. Кудымкар. С. 95–105.
2. *Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В.* Программирование для ГИС в рамках подготовки студентов, обучающихся по специальности «Информационные системы и технологии» // Актуальные вопросы образования. Ведущая роль университета в технической и кадровой модернизации российской экономики: Сб. материалов Междунар. науч.-методич. конф. В 3-х ч. Ч. 1. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. С. 87–90.
3. *Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В.* Создание виртуальных моделей местности и зданий // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск. Междунар. науч. конф. «Раннее предупреждение и управление в кризисных ситуациях в эпоху больших данных»: Сб. материалов. Т. 2. Новосибирск: СГУГиТ, 2016. С. 37–40.
4. *Яковлев Б.С., Пустов С.И.* Классификация и перспективные направления использования технологии дополненной реальности // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2013. № 3.
5. *Adler S., Schmitt S., Wolter K., Kyas M.* A survey of experimental evaluation in indoor localization research // Proceedings of the IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Banff, Alberta, Canada, October 2015. P. 1–10.
6. *Bonnet S., Bassompierre C., Godin C. et al.* Calibration methods for inertial and magnetic sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 2009. V. 156, No 2. P. 302–311.
7. *Chen D., Cho K., Shin K.G.* Mobile IMUs Reveal Driver's Identity From Vehicle Turns. CoRR, abs/1710.04578, arXiv technical report 2017.
8. *Chen X.* Human Motion Analysis with Wearable Inertial Sensors. PhD Dissertation, University of Tennessee, Knoxville, 2013.

9. *Colomar D.S., Nilsson J.-O., Handel P.* Smoothing for ZUPT-aided INSs // Proceedings of the IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Sydney, Australia, November 2012. P. 1–5.
10. *Groves P.D.* Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2nd ed.: Artech House, Boston and London, 2013.
11. *Kok M., Hol J.D., Sch T.B.* Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation. CoRR, abs/1704.06053, arXiv technical report 2017.
12. *Quan M., Piao S.* Robust visual-inertial {SLAM:} combination of {EKF} and optimization method. CoRR, abs/1706.03648, arXiv technical report 2017.
13. Reaserch Report «Global Augmented Reality (AR) Market Forecast by Product (HMD, HUD, Tablet PC, Smartphone) for Gaming, Automotive, Medical, Advertisement, Defense, E-learning & GPS Applications (2011–2016)», Market and Markets, 2011.
14. *Restuccia F., Ghosh N., Bhattacharjee S. et al.* Quality of Information in Mobile Crowdsensing: Survey and Research Challenges. CoRR, abs/1709.03583, arXiv technical report 2017.
15. *Wu Y., Pei L.* Gyroscope Calibration via Magnetometer. CoRR, abs/1707.07082, arXiv technical report 2017.
16. *Wu Y., Shi W.* On Calibration of Three-axis Magnetometer // IEEE Sensors Journal. 2015. T. 15. P. 6424–6431.
17. *Wu Y., Zou D., Liu P., Yu W.* Dynamic Magnetometer Calibration and Alignment to Inertial Sensors by Kalman Filtering // IEEE Trans. on Control System Technology. 2016.

REFERENCES

1. *Adler S., Schmitt S., Wolter K., Kyas M.* A survey of experimental evaluation in indoor localization research // Proceedings of the IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Banff, Alberta, Canada, October 2015. P. 1–10.
2. *Bonnet S., Bassompierre C., Godin C. et al.* Calibration methods for inertial and magnetic sensors. Sensors and Actuators A: Physical. 2009. V. 156, No 2. P. 302–311.
3. *Chen D., Cho K., Shin K.G.* Mobile IMUs Reveal Driver's Identity From Vehicle Turns. CoRR, abs/1710.04578, arXiv technical report 2017.
4. *Chen X.* Human Motion Analysis with Wearable Inertial Sensors. PhD Dissertation, University of Tennessee, Knoxville, 2013.
5. *Colomar D.S., Nilsson J.-O., Handel P.* Smoothing for ZUPT-aided INSs // Proceedings of the IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Sydney, Australia, November 2012. P. 1–5.
6. *Groves P.D.* Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2nd ed.: Artech House, Boston and London, 2013.
7. *Kikin P. M., Kolesnikov A. A., Komissarova E. V., Grishenko D.V.* Analysis of data from smartphone sensors when developing an application of a geo-positional augmented reality. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Ot karty proshlogo – k karte budushchego», 28–30 noyabrya 2017, g. Perm' – g. Kudymkar. P. 95–105 (in Russian).
8. *Kok M., Hol J.D., Sch T.B.* Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation. CoRR, abs/1704.06053, arXiv technical report 2017.
9. *Kolesnikov A.A., Kikin P.M., Komissarova E.V.* Creating virtual models of terrain and buildings. Interekspos GEO-Sibir'-2016. XII Mezhdunar. nauch. kongr., 18–22 apr. 2016, Novosibirsk. Mezhdunar. nauch. Konf. «Raneye preduprezhdeniye i upravleniye v krizisnykh situatsiyakh v epokhu bol'shikh dannykh»: Sb. materialov. V. 2. Novosibirsk: SSUGT, 2016. P. 37–40 (in Russian).

10. *Kolesnikov A.A., Kikin P.M., Komissarova E.V.* Programming for GIS in the framework of the preparation of students studying in the specialty "Information Systems and Technologies". Aktual'nyye voprosy obrazovaniya. Vedushchaya rol' univ-ta v tekhn. i kadrovoy modernizatsii rossiyskoy ekonomiki: sb. mater. Mezhdunar. nauchno-metodich. konf. Part. 1. Novosibirsk: SSUGT, 2015. P. 87–90 (in Russian).
11. *Quan M., Piao S.* Robust visual-inertial {SLAM:} combination of {EKF} and optimization method. CoRR, abs/1706.03648, arXiv technical report 2017.
12. Reaserch Report "Global Augmented Reality (AR) Market Forecast by Product (HMD, HUD, Tablet PC, Smartphone) for Gaming, Automotive, Medical, Advertisement, Defense, E-learning & GPS Applications (2011–2016)", Market and Markets, 2011.
13. *Restuccia F., Ghosh N., Bhattacharjee S. et al.* Quality of Information in Mobile Crowdsensing: Survey and Research Challenges. CoRR, abs/1709.03583, arXiv technical report 2017.
14. *Wu Y., Pei L.* Gyroscope Calibration via Magnetometer. CoRR, abs/1707.07082, arXiv technical report 2017.
15. *Wu Y., Shi W.* On Calibration of Three-axis Magnetometer. IEEE Sensors Journal. 2015. T. 15. P. 6424–6431.
16. *Wu Y., Zou D., Liu P., Yu W.* Dynamic Magnetometer Calibration and Alignment to Inertial Sensors by Kalman Filtering. IEEE Trans. on Control System Technology, 2016.
17. *Yakovlev B.S., Pustov S.I.* Classification and perspective directions of using the augmented reality technology. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. 2013. No 3 (in Russian).

СОДЕРЖАНИЕ

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

<i>Погорелов А.В., Брусило В.А., Граник Н.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ГОРОДА ПО ДАННЫМ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ	5
<i>Кравцова В.И.</i> КОСМИЧЕСКИЕ СНИМКИ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ АТЛАСЕ РОССИИ	18
<i>Иванова А.А., Балдина Е.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	27
<i>Баклагин В.Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА БЕЛОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ NSIDC	40
<i>Дорофеева Д.В., Пищальник В.М., Минервин И.Г., Пастухова Д.А., Шумилов И.В.</i> АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕКОВОГО РЯДА ЛЕДОВИТОСТИ ТАТАРСКОГО ПРОЛИВА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ	46
<i>Кравцова В.И., Другов М.Д.</i> ИЗМЕНЕНИЯ ДЮННОГО РЕЛЬЕФА АНАПСКОЙ ПЕРЕСЫПИ ПО МАТЕРИАЛАМ ПОВТОРНОГО ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ	55
<i>Калиничева С.В.</i> ВЫЯВЛЕНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ МЕРЗЛЫХ И ТАЛЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ КРИОЛИТОЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ ОЛЕКМО-ЧАРСКОГО НАГОРЬЯ В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ)	71
<i>Каргашин П.Е.</i> МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА ПО СНИМКАМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ	83
<i>Корец М.А., Скудин В.М.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ ВЫДЕЛОВ ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ	94
<i>Корнеевкова Н.Ю., Измайлова А.В.</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ОЗЕРНОГО ВОДНОГО ПОКРЫТИЯ РЕГИОНОВ НЕДОСТАТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ	106
<i>Литинский П.Ю.</i> 3D-МОДЕЛЬ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА СНИМКОВ LANDSAT КАК ОСНОВА ГЕОМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БОРЕАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ	116
<i>Паниди Е.А., Рыкин И.С., Цепелев В.Ю.</i> О ПРОБЛЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ГРАНИЦ ВЕГЕТАЦИОННЫХ СЕЗОНОВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	129
<i>Сидорина И.Е., Позднякова Н.А., Кружилина А.А., Поляков А.В.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ДЗЗ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ ДЛЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	141
<i>Сутырина Е.Н.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ AVHRR ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕРА БАЙКАЛ	151

<i>Шеремецкая Е.Д., Иванов М.М., Ворошилов Е.В., Гаранкина Е.В., Беляев В.Р.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КРУПНОМАСШТАБНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ В ЦЕЛЯХ ИЗУЧЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	158
<i>Шумилов И.В., Минервин И.Г., Пицальник В.М., Терентьев Н.С.</i> РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КРОМОК ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	171
<i>Кислякова Н.А., Варфоломеев А.Ф., Манухов В.Ф.</i> ИЗУЧЕНИЕ ОЧАГОВ ПОЖАРОВ И ГАРЕЙ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ	178
<i>Коросов А.В., Платонова Е.А.</i> ВЫЯВЛЕНИЕ ФИТОХОР С ОБУЧЕНИЕМ НА СМЕШАННЫХ ПОЛЕВЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ (НА ПРИМЕРЕ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ БОТАНИЧЕСКОГО САДА ПетрГУ)	186
<i>Гостева А.А., Матушко А.К., Якубайлик О.Э.</i> ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ИЗУЧЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В ГОРОДАХ (НА ПРИМЕРЕ г. КРАСНОЯРСКА, РОССИЯ)	195
<i>Китов А.Д., Гладков А.С., Лунина О.В., Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Серебряков Е.В., Афонькин А.М.</i> ГЕОРАДАРНЫЙ И ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕДНИКОВ ХРЕБТА МУНКУ-САРДЫК (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)	206
<i>Рыльский И.А.</i> ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ И ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ	216
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВИРТУАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ СРЕДЫ И КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОЙ ЗЕМЛИ	
<i>Jean A. Doumit</i> EVALUATION OF MULTISCALE TERRAIN ROUGHNESS BASED ON UAV DATASETS: A CASE OF A LEBANESE REGION	241
<i>Флоринский И.В., Филиппов С.В.</i> ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА: ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА BLENDER	250
<i>Ахметова Г.В., Бахмет О.Н., Новиков Г.С., Медведева М.В., Солодовников А.Н.</i> РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ПОЧВЫ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ»: ФОРМИРОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ И СТРУКТУРЫ	262
<i>Варшанина Т.П., Шехов З.А., Иззеддин М.Н.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РЕЛЬЕФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС	271
<i>Sakr C. Samar</i> ANALYSE DE L'AÉROLOGIE LOCALE DANS LA RÉGION DE BEYROUTH DURANT LA PÉRIODE ESTIVALE	281
<i>Васильев П.В., Чистов С.В., Криксунов Е.А., Бобырев А.Е.</i> КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ РЫБ ПСКОВСКОГО ОЗЕРА	292
<i>Халыков Е.Е.</i> ОСОБЕННОСТИ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ОБРАЖНОЙ ЭРОЗИИ НА ПРИМЕРЕ ОБРАГОВ ДОЛИНЫ РЕКИ МУКЫР	306
<i>Выручалкина Т.Ю., Фролов А.В.</i> БАТИМЕТРИЧЕСКИЕ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОЛЬШОГО ЯШАЛТИНСКОГО ОЗЕРА В МОДЕЛИРОВАНИИ ВОДНО-СОЛЕВОГО БАЛАНСА ВОДОЕМА	319

<i>Занозин В.В., Бармин А.Н., Занозин В.В.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ	329
<i>Шурыгина А.А., Самсонов Т.Е.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ГРАФОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В РАСПОЗНАВАНИИ СЕТЕЙ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ	340
<i>Шестакова А.А., Спектор В.Б., Торговкин Я.И.</i> ОПЫТ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)	347
<i>Калинкина Н.М., Коросов А.В., Белкина Н.А., Теканова Е.В., Сярки М.Т., Коросов А.А.</i> ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «БИОРЕСУРСЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА»	362
<i>Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В., Касьянова Е.Л.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ЗАДАЧ	371
<i>Баранова М.С., Филиппов О.В., Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С.</i> АТРИБУТИВНАЯ БАЗА ДАННЫХ ЗАЛИВОВ ВОЛГОГРАДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА	385
<i>Колесников А.А., Кикин П.М., Середович С.В.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ГЕОПОЗИЦИОННОЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ	396

CONTENTS

REMOTE SENSING METHODS IN RESEARCH OF THE EARTH

<i>Anatoly V. Pogorelov, Vladimir A. Brusilo, Nikolai V. Granik</i> MODELING OF URBAN GREEN SPACES BASED ON MOBILE LASER SCANNING DATA	5
<i>Valentina I. Kravtsova</i> SATELLITE IMAGES IN ECOLOGICAL ATLAS OF RUSSIA	18
<i>Anna A. Ivanova, Elena A. Baldina</i> THE RESEARCH AND MAPPING OF THE THERMAL IMPACT OF RAILWAY TRANSPORT NODES ON THE ENVIRONMENT FROM REMOTE SENSING DATA	27
<i>Vyacheslav N. Baklagin</i> STUDY OF THE ICE REGIME OF THE WHITE SEA BY SATELLITE DATA OF NSIDC	40
<i>Daria V. Dorofeeva, Vladimir M. Pishchalnik, Igor G. Minervin, Daria A. Pastyhova, Ilya V. Shumilov</i> VARIABILITY ANALYSIS OF THE CENTURIAL ICE COVER SERIES OF TATAR STRAIT ON THE BASIS OF SATELLITE AND HYDROMETEOROLOGICAL OBSERVATIONS USING GIS TECHNOLOGIES	46
<i>Valentina I. Kravtsova, Mikhail D. Drugov</i> CHANGES OF ANAPA BAY BAR DUNE RELIEF BASED ON REPEATED AIRBORNE LASER SCANNING	55
<i>Svetlana V. Kalinicheva</i> IDENTIFICATION AND MAPPING OF PERMAFROST AND THALIKS USING SATELLITE IMAGES (ON THE EXAMPLE OF THE OLEKMO-CHARSKIY HIGHLAND IN SOUTHERN YAKUTIA)	71
<i>Pavel E. Kargashin</i> VISUAL INTERPRETATION OF OIL AND GAS CONDENSATE FIELD FACILITIES FROM LANDSAT IMAGES	83
<i>Mikhail A. Korets, Viktor M. Skudin</i> AUTOMATED APPROACH FOR MAPPING OF FOREST INVENTORY POLYGONS ON THE BASE OF SPACE IMAGERY AND DIGITAL ELEVATION MODEL	94
<i>Natalya Yu. Korneenkova, Anna V. Izmailova</i> SPATIAL AND TEMPORAL HETEROGENEITY OF WATER SURFACE AREA OF LAKES IN THE REGIONS OF INSUFFICIENT MOISTURE WITH USING THE SATELLITE IMAGES	106
<i>Peter Yu. Litinsky</i> 3D MODEL OF THE SPECTRAL SPACE OF LANDSAT IMAGES AS THE BASIS OF THE BOREAL ECOSYSTEMS GEOMATIC MODEL	116
<i>Evgeny A. Panidi, Ivan S. Rykin, Valery Yu. Tsepelev</i> TOWARDS THE ISSUE OF ALLOCATION OF THE TIME FRAMES FOR GROWING SEASONS USING GROUND OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING DATA	129
<i>Inessa E. Sidorina, Natalia A. Pozdnyakova, Anastasia A. Kruzhilina, Andrey V. Polyakov</i> APPLICATION OF DATA OF LAND REMOTE SENSING IN GIS FOR ARCHAEOLOGICAL RESEARCHES	141
<i>Ekaterina N. Sutyryna</i> THE APPLICATION OF AVHRR DATA FOR THE STUDY OF HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS OF LAKE BAIKAL	151
<i>Elena D. Sheremetskaya, Maxim M. Ivanov, Egor V. Voroshilov, Ekaterina V. Garankina, Vladimir R. Belyaev</i> USING UAV LARGE-SCALE AERIAL PHOTOGRAPHY FOR STUDYING HAZARDOUS GEOMORPHOLOGICAL PROCESSES	158

<i>Ilya V. Shumilov, Igor G. Minervin, Vladimir M. Pishchal'nik, Nikolay S. Terentyev</i> DEVELOPMENT OF THE PROGRAM MODULE FOR CALCULATION OF ICE EDGES BY THE EARTH REMOTE SENSING DATA	171
<i>Natalia A. Kislyakova, Alexander F. Varfolomeev, Vladimir F. Manukhov</i> STUDY OF HOTSPOTS AND CINDERS IN THE WESTERN PART OF THE REPUBLIC OF MORDOVIA USING SPACE INFORMATION	178
<i>Andrey V. Korosov, Elena A. Platonova</i> IDENTIFICATION OF PHYTOHORES WITH TRAINING ON MIXED FIELD AND SPACE DATA (USING THE EXAMPLE OF THE NATURAL TERRITORY OF THE BOTANICAL GARDEN OF PetrSU)	186
<i>Anna A. Gosteva, Aleksandra K. Matuzko, Oleg E. Yakubailik</i> REMOTE METHODS IN STUDYING THE TEMPERATURE OF THE EARTH'S SURFACE IN CITIES (ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF KRASNOYARSK, RUSSIA)	195
<i>Aleksandr D. Kitov, Andrey S. Gladkov, Oxana V. Lunina, Viktor M. Plyusnin, Egor N. Ivanov, Evgeniy V. Serebrykov, Andrey M. Afon'kin</i> GPR AND REMOTE MONITORING OF GLACIERS OF THE RIDGE MUNKU-SARDYK (THE EAST SAYAN)	206
<i>Ilya A. Ryl'skiy</i> APPROACHES TO THE DETERMINATION OF TAXATION INDICATORS OF FORESTS USING AEROSPACE IMAGES AND LIDAR DATA	216

GEOINFORMATION MODELING, VIRTUAL GEOGRAPHICAL ENVIRONMENTS AND THE CONCEPT OF DIGITAL EARTH

<i>Jean A. Doumit</i> EVALUATION OF MULTISCALE TERRAIN ROUGHNESS BASED ON UAV DATASETS: A CASE OF A LEBANESE REGION	241
<i>Igor V. Florinsky, Sergey V. Filippov</i> THREE-DIMENSIONAL TERRAIN MODELING: APPLICATION OF THE BLENDER PACKAGE	250
<i>Gulnara V. Akhmetova, Olga N. Bakhmet, Sergey G. Novikov, Maria V. Medvedeva, Anton N. Solodovnikov</i> DEVELOPMENT OF THE GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM "SOILS OF THE REPUBLIC OF KARELIA": DESIGNING THE CONCEPT AND THE STRUCTURE	262
<i>Tatiana P. Varshanina, Zaurbiy A. Shekhov, M.N. Izzeddin</i> GIS MODEL OF AUTOMATED CLASSIFICATION OF THE TECTONIC RELIEF	271
<i>Sakr C. Samar</i> ANALYSIS OF LOCAL AEROLOGY IN THE REGION OF BEIRUT DURING THE SUMMER PERIOD	281
<i>Pavel V. Vasilev, Sergey V. Chistov, Evgeniy A. Kriksunov, Alexander E. Bobyrev</i> CARTOGRAPHIC MODELING OF SPATIAL-TEMPORAL DYNAMICS OF FISH POPULATIONS FROM PSKOV LAKE	292
<i>Erkebulan E. Khalykov</i> PECULIARITIES OF MAPPING GULLY EROSION ON THE EXAMPLES OF THE GULLIES OF THE VALLEY OF THE RIVER MUKIR	306
<i>Tatiana Yu. Vyruchalkina, Anatoliy V. Frolov</i> BATHYMETRIC AND MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE BOLSHOE YASHALTINSKOE LAKE IN THE MODELING OF RESERVOIR'S WATER-SALT BALANCE	319
<i>Victor V. Zanozin, Alexander N. Barmin, Valery V. Zanozin</i> THE GEOINFORMATION APPROACH IN THE ELECTION OF NATURAL TERRITORIAL COMPLEXES OF THE VOLGA RIVER DELTA	329

<i>Anastasia A. Shurygina, Timofey E. Samsonov</i> RECOGNITION OF NATURAL AND ANTROPOGENIC NETS BASED ON THE GRAPH THEORY AND METHODS OF MACHINE LEARNING	340
<i>Alyona A. Shestakova, Vladimir B. Spektor, Yaroslav I. Torgovkin</i> EXPERIENCE OF ENGINEERING-GEOCRYOLOGICAL MAPPING OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)	347
<i>Nataliia M. Kalinkina, Andrei V. Korosov, Natalya A. Belkina, Elena V. Tekanova, Maria T. Syarki, Anton A. Korosov</i> GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM "BIOLOGICAL RESOURCES OF ONEGO LAKE"	362
<i>Alexey A. Kolesnikov, Pavel M. Kikin, Elena V. Komissarova, Elena L. Kasyanova</i> USE OF MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES IN DECISION OF GEOINFORMATIONAL TASKS	371
<i>Maria S. Baranova, Oleg V. Filippov, Anna I. Kochetkova, Elena S. Bryzgalina</i> ATTRIBUTIVE DATABASE OF BAYS OF THE VOLGOGRAD RESERVOIR	385
<i>Alexey A. Kolesnikov, Pavel M. Kikin, Sergey V. Seredovich</i> USING THE SYNERGY METHOD FOR IMPROVEMENT OF THE ACCURACY OF LOCATION BASED AUGMENTED REALITY	396

СЕРИЯ КОНФЕРЕНЦИЙ ИНТЕРКАРТО/ИНТЕРГИС

- ИнтерКарто 1 – Москва, 23–25 мая 1994 г.
ИнтерКарто 2 – Иркутск, 26–29 июня 1996 г.
ИнтерКарто 3 – Новосибирск, 27–31 января 1997 г.
ИнтерКарто 4 – Барнаул, 1–4 июля 1998 г.
ИнтерКарто 5 – Якутск, 17–19 июня 1999 г.
ИнтерКарто 6 – Апатиты, 22–24 августа 2000 г.
ИнтерКарто 7 – Петропавловск-Камчатский, 30 июля – 1 августа 2001 г.
ИнтерКарто 8 – Хельсинки (Финляндия), Санкт-Петербург, 28 мая – 1 июня 2002 г.
ИнтерКарто 9 – Новороссийск, Севастополь (Украина), 25–29 июня 2003 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 10 – Владивосток, Чанчунь (Китай), 12–19 июля 2004 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 11 – Ставрополь, Домбай, Будапешт (Венгрия), 25 сентября – 3 октября 2005 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 12 – Калининград, Берлин (Германия), 25–31 августа 2006 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 13 – Ханты-Мансийск, Йеллоунайф (Канада), 12–24 августа 2007 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 14 – Саратов, Урумчи (Китай), 24 июня – 1 июля 2008 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 15 – Пермь, Гент (Бельгия), 29 июня – 5 июля 2009 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 16 – Ростов-на-Дону, Зальцбург (Австрия), 3–8 июля 2010 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 17 – Белокуриха, Алтайский край, Денпасар (Индонезия), 14–19 декабря 2011 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 18 – Смоленск, Сен-Дье-де-Вож (Франция), 26 июня – 4 июля 2012 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 19 – Курск, Богота (Колумбия), 2–7 февраля 2013 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 20 – Белгород, Харьков (Украина), Кигали (Руанда) и Найроби (Кения), 23 июля – 6 августа 2014 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 21 – Краснодар, Сочи, Сува (Фиджи), 12–19 ноября 2015 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 22 – Веллингтон (Новая Зеландия), Мельбурн (Австралия), Протвино (Московская обл.), 31 августа – 14 сентября 2016 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 23 – Южно-Сахалинск, Сеул (Республика Корея), Вашингтон (США), 26 июня – 7 июля 2017 г.
ИнтерКарто/ИнтерГИС 24 – Петрозаводск, Бонн (Германия), Анкоридж (США), 19 июля – 1 августа 2018 г.

INTERCARTO/INTERGIS CONFERENCE SERIES

- InterCarto 1 – Moscow, May 23–25, 1994
InterCarto 2 – Irkutsk, June 26–29, 1996
InterCarto 3 – Novosibirsk, January 27–31, 1997
InterCarto 4 – Barnaul, July 1–4, 1998
InterCarto 5 – Yakutsk, June 17–19, 1999
InterCarto 6 – Apatity, Murmansk Province, August 22–24, 2000
InterCarto 7 – Petropavlovsk-Kamchatsky, July 30 – August 1, 2001
InterCarto 8 – Helsinki (Finland), St.-Petersburg, May 28 – June 1, 2002
InterCarto 9 – Novorossiysk, Sevastopol (Ukraine), June 25–29, 2003
InterCarto/InterGIS 10 – Vladivostok, Changchun (China), July 12–19, 2004
InterCarto/InterGIS 11 – Stavropol, Dombai, Budapest (Hungary), September 25 – October 3, 2005
InterCarto/InterGIS 12 – Kaliningrad, Berlin (Germany), August 25–31, 2006
InterCarto/InterGIS 13 – Khanty-Mansiysk, Yellowknife (Canada), August 12–24, 2007
InterCarto/InterGIS 14 – Saratov, Urumqi (China), June 24 – July 1, 2008
InterCarto/InterGIS 15 – Perm, Ghent (Belgium), June 29 – July 5, 2009
InterCarto/InterGIS 16 – Rostov-on-Don, Salzburg (Austria), July 3–8, 2010
InterCarto/InterGIS 17 – Belokurikha, Denpasar (Indonesia), December 14–19, 2011
InterCarto/InterGIS 18 – Smolensk, St. Die des Vosges (France), June 26, – July 4, 2012
InterCarto/InterGIS 19 – Kursk, Bogota (Colombia), February 2–8, 2013
InterCarto/InterGIS 20 – Belgorod, Kharkov (Ukraine), Kigali (Rwanda), Nairobi (Kenya), July 23 – August 6, 2014
InterCarto/InterGIS 21 – Krasnodar, Sochi, Suva (Fiji), November 12–19, 2015
InterCarto/InterGIS 22 – Wellington (New Zealand), Melbourne (Australia), Protvino (Moscow Region), August 31 – September 14, 2016
InterCarto/InterGIS 23 – Yuzhno-Sakhalinsk, Seoul (Republic of Korea), Washington DC (USA), June 26 – July 7, 2017
InterCarto/InterGIS 24 – Petrozavodsk, Bonn (Germany), Anchorage (USA), July 19 – August 1, 2018

Научное издание
ИнтерКарто/ИнтерГИС
**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ**
Материалы Международной конференции
Петрозаводск (Россия), Бонн (Германия), Анкоридж (США)

19 июля – 1 августа 2018 г.

Том 24

Часть 2

Оформление обложки *К.В. Саутенков*
Редакторы *Л.В. Кабанова, М.А. Радостина*
Компьютерная верстка *Н.Н. Сабанцева, М.И. Федорова*

Подписано в печать 25.06.2018 г. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 39,84. Усл. п. л. 48,36. Тираж 300 экз. Заказ № 497.

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»
Редакционно-издательский отдел
185003, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50